

Université de Mostaganem



Université de Mostaganem



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**THÈSE**

**Présentée pour obtenir le grade de Docteur en science**

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : Génie Civil**

**Présentée par : LATROCH NOUREDDINE**

**« EFFET DES AGRÉGATS À BASE DE DÉCHETS  
PLASTIQUES SUR LES DIFFÉRENTES PROPRIÉTÉS DES  
MATÉRIAUX COMPOSITES MORTIER-POLYMÈRE »**

*Soutenue publiquement le xxx*

*Devant le jury composé de :*

Mme N. BELAS	Professeur, Université de Mostaganem	Présidente
Mr. A.S. BENOSMAN	MCA, ESSAT de Tlemcen	Encadrant
Mr. N. BOUHAMOU	Professeur, Université de Mostaganem	Co-Encadrant
Mr. H. TAIBI	Professeur, Université d'Oran 1	Examineur
Mr. A. MEBROUKI	Professeur, Université de Mostaganem	Examineur
Mr. Y. SENHADJI	MCA, Université de Mascara	Examineur

**ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019**

*Je dédie ce modeste travail à*

*Ma mère,*

*Mon père,*

*Ma famille,*

*Mes professeurs,*

*Ainsi que tous mes amis,*

*Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*LATROCH Nouredine*

# Remerciements

---

## Remerciements

Les travaux de thèse ont été une expérience unique pour moi, rendue possible grâce à de nombreuses personnes que je souhaite remercier.

J'ai l'honneur d'être dirigé par Monsieur BENOSMAN Ahmed Soufiane, Maitre de Conférences « A » à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen ESSAT, dans la présente recherche. Je tiens à le remercier énormément pour avoir encadré et suivi ce travail avec patience tout au long de ces quatre années. Merci beaucoup, encore une fois, pour sa disponibilité, pour les nombreuses et intéressantes discussions scientifiques, pour les remarques et les orientations constructives, pour les nombreux conseils avisés, pour ces encouragements quotidiens, pour le soutien permanent, pour sa compréhension, pour la confiance qu'il m'a accordée et qu'il a toujours témoignée à mon égard, pour son écoute et, tout simplement pour sa gentillesse.

J'adresse également mes remerciements les plus vifs à Messieurs BOUHAMOU Nasr-Eddine, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem ; SENHADJI Yassine, Maitre de Conférences « A » à l'Université de Mascara et MOULI Mohamed, Professeur à l'ENPO-MA d'Oran, pour le temps qui m'ont consacré au suivi efficace de mes travaux, pour leurs expériences scientifiques, conseils, encouragements, participations à mes essais et leurs disponibilités ont été un soutien indispensable à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier vivement Mme BELAS Nadia, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, d'avoir accepté de présider mon jury de thèse, sa présence dans le jury de ma soutenance me fait l'honneur.

Je remercie Monsieur TAIBI Hamed, Professeur à l'Université d'Oran 1, Ahmed Benbella, Monsieur MEBROUKI Abdelkader, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem et Monsieur SENHADJI Yassine, Maitre de Conférences classe « A » à l'Université de Mascara, d'être présent comme membre du jury dans ma thèse. Leur présence m'honore.

Toutes mes amitiés vont à Monsieur BELBACHIR Boucif, Maitre de Conférences « B » à l'Université d'Oran 1, Ahmed Benbella, Laboratoire de Chimie des Polymères LCP.

## Remerciements

---

Mes remerciements vont aussi à tous les membres des laboratoires et techniciens, qui ont participé indirectement ou directement au bon déroulement des différentes méthodes d'analyse et de caractérisation de nos matériaux à savoir :

- Laboratoire de Matériaux LABMAT du département de Génie Civil, ENPO Maurice Audin d'Oran ;
- Laboratoire Construction Transport et Protection de l'Environnement LCTPE, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem ;
- Laboratoire de Catalyse et Synthèse en Chimie Organique (LCSCO), Université Abou Bekr Belkaïd (Tlemcen) ;
- Laboratoire « Eau Energie Environnement » (LR3E), Université de Sfax - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), Sfax, Tunisie ;
- Laboratoire des Propriétés de la Matière Condensée (utilisation du MEB/EDS) de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen ;
- Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions LMDC, INSA de Toulouse, France ;
- Laboratoire de Recherche Science Technologie et Génie des Procédés (LSTGP) USTOMB ;
- Laboratoire de Biologie Botanique de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen ;
- Laboratoire des essais pour mortiers et bétons prêts à l'emploi du Groupe des Sociétés HASNAOUI d'Oran.

Je tiens spécialement à remercier mes collègues Mrs BADACHE A. et HASSINI M. pour leur gentillesse et leur motivation. Un grand merci va aussi pour mes amis : MEDJAHED A., DJEBARA A. et GOUASMI M.T.

Enfin, tous mes remerciements vont à ceux qui, de près ou de loin m'ont apporté leur aide.

## SOMMAIRE

Liste des figures .....	i
Liste des tableaux .....	vii
Liste des abréviations .....	viii
RESUME .....	ix
ABSTRACT .....	x
ملخص .....	xi
Introduction générale.....	1

### Chapitre I

#### Revue Bibliographique

I.1. <b>Introduction</b> .....	5
I.2. <b>Le ciment Portland</b> .....	5
I.3. <b>Les superplastifiants</b> .....	6
I.4. <b>L’impact des déchets plastiques sur l’environnement</b> .....	8
I.5. <b>La gestion des déchets plastiques</b> .....	9
I.6. <b>Les déchets légers et leurs applications dans le domaine de Génie civil</b> .....	10
I.7. <b>Les plaques de PVC expansés « FOREX »</b> .....	13
I.8. <b>Types et quantités de substitutions des agrégats naturels par des agrégats légers dans le mortier / béton</b> .....	16
I.9. <b>Evaluation des propriétés des mortiers/bétons à base des agrégats légers</b> .....	18
I.9.1. Maniabilité (Affaissement).....	19
I.9.2. Densité .....	21
I.9.3. Propriétés mécaniques.....	23
I.9.3.1. Résistance à la compression.....	23
I.9.3.2. Résistance à la flexion.....	24
I.9.4. Caractéristiques des ruptures.....	26
I.9.5. Module d'élasticité.....	27
I.9.6. Vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV).....	28
I.9.7. La microstructure.....	30
I.9.8. Propriétés thermo-physiques.....	32
I.9.9. Comportement à haute température (résistance au feu).....	33
I.9.10. Performances de la durabilité.....	38

I.9.10.1. Porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire.....	38
I.9.10.2. Pénétration des ions chlorures.....	40
<b>I.10. Synthèse de la revue bibliographique.....</b>	<b>42</b>
<b>I.11. Problématique et axes de recherche.....</b>	<b>43</b>
Index bibliographique - Chapitre I.....	44

## Chapitre II

### Matériaux utilisés et méthodes d'essais

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>50</b>
<b>II.2. Matériaux utilisés .....</b>	<b>51</b>
II.2.1. Le ciment .....	51
II.2.2. Le sable .....	51
II.2.3. L'agrégat de PVC expansé (EPVC).....	52
II.2.4. Superplastifiant.....	56
<b>II.3. Elaboration des mortiers composites légers LMEPVC.....</b>	<b>56</b>
<b>II.4. Essai de maniabilité sur mortiers frais (Flow Test).....</b>	<b>58</b>
<b>II.5. Technique expérimental.....</b>	<b>59</b>
<b>II.5.1. Essais de caractérisation mécanique.....</b>	<b>59</b>
II.5.1.1 Mesure des résistances mécaniques.....	59
II.5.1.2. Essai d'ultrason (Ultrasonic pulse velocity test) –UPV.....	61
II.5.1.3. Détermination du module d'élasticité dynamique.....	61
<b>II.5.2. Essais de caractérisation physico-thermique.....</b>	<b>61</b>
II.5.2.1. Densité à l'état sec .....	61
II.5.2.2. Porosité accessible à l'eau .....	62
II.5.2.3. Absorption capillaire -Sorptivité-.....	62
II.5.2.4. L'essai des propriétés thermiques.....	63
<b>II.5.3. Essai de chauffage-refroidissement.....</b>	<b>64</b>
<b>II.6. Caractérisation microstructurale des LMEPVCs à l'état durci.....</b>	<b>66</b>
II.6.1. Microscope optique MOP.....	67
II.6.2. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	67
II.6.3. Diffraction des rayons X (DRX).....	68
II.6.4. Spectrométrie infrarouge (IRTF).....	70
<b>II.7. Test de la pénétration d'ion chlore.....</b>	<b>70</b>
<b>II.8. Conclusion.....</b>	<b>72</b>
Index bibliographique - Chapitre II.....	73

### Chapitre III

#### Propriétés Physico-Mécaniques et Thermiques des Mortiers Légers LMEPVC

<b>III.1. Introduction</b> .....	75
<b>III.2. Maniabilité sur mortiers frais (Flow Test)</b> .....	75
<b>III.3. Densité à l'état durci</b> .....	76
<b>III.4. Caractéristiques mécaniques des mortiers LMEPVC</b> .....	77
III.4.1. Résistance à la compression .....	77
III.4.2. Résistance à la flexion.....	81
III.4.3. Etat des éprouvettes après l'essai de résistance à la flexion.....	85
<b>III.5. Caractérisation microstructurale des mortiers légers à l'état durci</b> .....	87
III.5.1. Microscopie optique (MOP).....	87
III.5.2. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	88
III.5.3. Diffraction des rayons X (DRX).....	89
III.5.4. Spectrométrie infrarouge IRTF .....	91
<b>III.6. Vitesse de propagation des ondes sonores UPV</b> .....	93
<b>III.7. Module d'élasticité dynamique</b> .....	94
<b>III.8. Caractérisation des propriétés thermiques</b> .....	96
III.8.1. Conductivité thermique ( $\lambda$ ) .....	96
III.8.2. Capacité calorifique ( $C_p$ ) .....	98
III.8.3. Diffusivité thermique ( $a$ ).....	99
<b>III.9. Relation entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs</b> .....	102
<b>III.10 Conclusion</b> .....	103
Index bibliographique - Chapitre III.....	105

### Chapitre IV

#### Etude du Comportement sous Hautes Températures des Mortiers Légers LMEPVC

<b>IV.1. Introduction</b> .....	108
<b>IV.2. Influence de l'exposition à hautes températures sur les propriétés physico-mécaniques des LMEPVCs</b> .....	108
IV.2.1. Perte de masse.....	108
IV.2.2. Volume des éprouvettes après chauffage.....	109

IV.2.3. Porosité accessible à l'eau.....	111
IV.2.4. Vitesse de propagation des ondes sonores UPV.....	112
IV.2.5. Module d'élasticité dynamique.....	113
IV.2.6. Caractérisation mécanique des LMEPVCs à hautes températures.....	114
IV.2.6.1. Résistance à la compression.....	115
IV.2.6.2. Facteur d'endommagement .....	116
IV.2.6.3. Résistance à la flexion.....	117
IV.2.6.4. Corrélation entre l'UPV et la résistance à la compression .....	118
<b>IV.3. Examen visuel des éprouvettes LMEPVCs à hautes températures .....</b>	<b>121</b>
<b>IV.4. Caractérisation microstructurale des LMEPVCs à hautes températures.</b>	<b>121</b>
IV.4.1. Microscopie optique (MOP).....	121
IV.4.2. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	119
IV.4.3. Diffraction des rayons X (DRX).....	124
IV.4.4. Spectrométrie infrarouge (IRTF) .....	125
<b>IV.5. Evolution des propriétés thermiques en fonction de la température.....</b>	<b>126</b>
IV.5.1. Conductivité thermique ( $\lambda$ ).....	127
IV.5.2. Capacité calorifique ( $C_p$ ).....	128
IV.5.3. Diffusivité thermique ( $a$ ).....	129
<b>IV.6. L'influence de la vitesse du chauffage sur les propriétés des mortiers LMEPVCs.....</b>	<b>130</b>
IV.6.1. Perte de masse .....	130
IV.6.2. Résistances mécaniques.....	131
IV.6.3. Caractérisation des propriétés thermiques .....	132
IV.6.4. Effet de la vitesse de chauffage sur l'état des éprouvettes .....	133
<b>IV.7. Relation entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des LMEPVCs à hautes températures.....</b>	<b>134</b>
<b>IV.8. Conclusion.....</b>	<b>136</b>
Index bibliographique - Chapitre IV.....	139



**Chapitre V**  
**Attaque Chimique des Mortiers Composites Légers LMEPVC par les**  
**Ions Chlorures**

<b>V.1. Introduction.....</b>	<b>141</b>
<b>V.2. Evolution de la porosité des mortiers composites LMEPVC.....</b>	<b>141</b>
<b>V.3. Mesure du coefficient de la sorptivité des composites LMEPVCs.....</b>	<b>143</b>
<b>V.4. Test de la pénétration d'ions chlorures - l'essai d'immersion totale -.....</b>	<b>146</b>
<b>V.5. Coefficients de diffusion apparents des ions chlorures.....</b>	<b>149</b>
<b>V.6. Relation entre les différents paramètres des LMEPVCs.....</b>	<b>152</b>
<b>V.7. Conclusion.....</b>	<b>153</b>
<b>Index bibliographique - Chapitre V.....</b>	<b>155</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>158</b>

Listes des figures  
Chapitre I

<b>Figure I.1 :</b> Une section polie de mortier au microscope optique (x500). (C <sub>x</sub> S) : les silicates et (C <sub>x</sub> (A, F)) : les aluminates [2].....	6
<b>Figure I.2 :</b> Représentation schématique d'une molécule d'un superplastifiant à base de (a) Sels de sodium de poly-naphtalène sulfoné (b) Polymélamine sulfoné [3,4].....	7
<b>Figure I.3 :</b> Action des superplastifiants - Déflocculation des grains de ciment [4].....	7
<b>Figure I.4 :</b> Certains types des matières recyclables d'origine industrielle utilisées dans les applications en génie civil :(1) Polyéthylène téréphtalate (PET) [37] (2) Déchets des pièces plastiques électroniques [38] (3) Chaussures en caoutchouc [39] (4) Poudre de liège [29] (5) Agrégat de PVC [40] (6) Les déchets de bois [25] (7) Mousse de verre [41] (8) Polystyrène expansé (PSE – bille découpée) [42] (9) Mousse de polyuréthane extrudé rigide (PUR) [42].....	11
<b>Figure I.5 :</b> Type des agrégats plastiques utilisés dans le béton / mortier. (a) Ethylène-acétate de vinyle - (EVA) (4/8 mm) [43], (b) Câbles en polychlorure de vinyle (PVC) (0/4 mm) [43], (c) Tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) (<5 mm) [15], (d) Polyéthylène téréphtalate (PET) (<1mm) [16], (e) Polycarbonate (PC) (<5mm) [37], (f) Polyéthylène à haute densité (PEHD) [44], (G) Caoutchouc pneumatique (SBR) (1)- (1/2 mm) (2)-(2/4 mm) (3)-(4/8 mm) [45],(H) Caoutchouc pneumatique – à gauche (agrégats) / à droite (déchets) [46].....	12
<b>Figure I.6 :</b> Type des fibres plastiques utilisées dans le béton / mortier. (1) Fibres de PET laminaires courtes [47], (2) fibre de PET coupée à la main [48], (3,4) PET [49], (5) fibre de déchets de moquette [50], (6) fibres de PET de longueur de 50 mm: (a) type droit (section transversale 0.5 × 1 mm), (b) type serti (section transversale 0.3 × 1.2 mm), (c) type en relief (section transversale 0.2 × 1.3 mm) [51].....	13
<b>Figure I.7 :</b> Décoration des magasins par des plaques de FOREX.....	14
<b>Figure I.8 :</b> Panneau de FOREX pour la signalisation.....	14
<b>Figure I.9 :</b> Les plaques de FOREX.....	15
<b>Figure I.10 :</b> La figuration des plaques de FOREX.....	15
<b>Figure I.11 :</b> La variation de l'affaissement du béton avec le niveau de la substitution des agrégats plastiques [70]: (1), (2), (3): agrégats fins [71]; (4): agrégats grossiers [72]; (5): agrégats fins [64]; (6): agrégats fins [73]; et (7): agrégats fins [74].....	19
<b>Figure I.12 :</b> Etalement du béton en fonction du pourcentage de E-plastic [38].....	21
<b>Figure I.13 :</b> L'influence de l'incorporation des matières plastiques comme agrégat sur la densité du béton/mortier[70]: (1): [75]; (2): [76]; (3): [72]; (4): [77]; et (5): [78]... ..	21
<b>Figure I.14 :</b> La densité du béton en fonction du pourcentage d'E- plastique à 28 jours [38].....	22
<b>Figure I.15 :</b> La variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des agrégats plastiques à 28 jours[70] : (1), (2), (3): WPLA [75]; (4): Mélange de plastique [64]; (5), (6): PET [82]; (7): PVC [15]; (8): HIPS [83]; (9): EPS [23]; et (10): PET [84].....	23
<b>Figure I.16 :</b> La variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage des agrégats plastiques à 28 jours [70]: (1), (2), (3): PET [82] ; (4): plastique mixte [64]; (5): plastique mixte (80% PET) [60]; (6): plastique mixte [74] ; et (7): PET [84].....	25
<b>Figure I.17 :</b> Etat des éprouvettes des mortiers contenant des agrégats de PEHD après les essais de flexion et de compression [44].....	26
<b>Figure I.18 :</b> Mode de défaillance des échantillons des mortiers contenant des agrégats de PET, après les essais de flexion [88].....	26
<b>Figure I.19 :</b> Type de rupture des éprouvettes cylindriques observée après les essais des résistances à la compression [37].....	27

## Listes des figures

<b>Figure I.20</b> :La variation du module d'élasticité en fonction du pourcentage des agrégats plastiques à 28 jours [70]: (1), (2), (3): WPLA [54]; (4): PET [54]; (5), (6), (7): PET [82]; (8): PVC [15]; (9), (10): EPS [75]; (11): EPS [72]; et (12): PET [84].	28
<b>Figure I.21</b> : Les valeurs de l'UPV du béton contenant différents taux de PET à différents âges [88].	29
<b>Figure I.22</b> : Les valeurs de l'UPV du béton contenant différents taux de SPS à différents âges [27].	30
<b>Figure I.23</b> :Images MEB des bétons contenant des agrégats PET ( $\leq 2$ mm) :30%, (b) 50%, (c) 100% [82].	30
<b>Figure I.24</b> : Images MEB des bétons contenant des agrégats PET à 50% : Types : A (5 mm), C (2 mm) et D (1 mm) ; (a) Type A, (b) Type C; et (c) Type D [82].	31
<b>Figure I.25</b> : Zone ITZ entre la pâte de ciment et l'agrégat de PEHD dans un mortier contenant 60% de PEHD [44].	31
<b>Figure I.26</b> : Zone ITZ entre la matrice cimentaire et la mousse de polyuréthane comme agrégats dans le béton à 28 jours. (a) ( $\times 100$ ); (b) ( $\times 300$ ); et (c) ( $\times 500$ ) [63].	32
<b>Figure I.27</b> : Images MEB de la microstructure des échantillons : (a) WPLA; (b) WPLA100 [91].	32
<b>Figure I.28</b> : Corrélation entre la densité et la conductivité thermique des mortiers contenant des agrégats GFRP [79].	33
<b>Figure I.29</b> : La résistance à la flexion des bétons contenant des agrégats de PET substituants le sable naturel après l'exposition à hautes températures [55].	34
<b>Figure I.30</b> : Courbes de traitement thermique à différentes températures d'exposition selon la norme ISO 834 [94].	35
<b>Figure I.31</b> :Eprouvette de béton contenant 15% d'agrégats de caoutchouc à différentes températures [67].	35
<b>Figure I.32</b> :l'UPV résiduels en fonction de la température d'exposition. [66].	36
<b>Figure I.33</b> : Corrélation entre la résistance à la compression et l'UPV des composites après exposition à hautes températures [66].	36
<b>Figure I.34</b> :L'effet des températures élevées sur la porosité ouvert des mortiers contenant des agrégats de caoutchouc (RRA) [68].	36
<b>Figure I.35</b> :L'effet des températures élevées sur la résistance à la compression des mortiers contenant des agrégats de caoutchouc (RRA) [68].	36
<b>Figure I.36</b> : La résistance à la compression des bétons contenant des agrégats HIPS à différentes températures [95].	37
<b>Figure I.37</b> :L'effet des températures élevées sur l'UPV des bétons contenant des agrégats HIPS [95].	37
<b>Figure I.38</b> :Coefficients de sorptivité du mortier à différents volumes de granulats WPLA [54].	39
<b>Figure I.39</b> :Coefficients de la sorptivité du béton à différents volumes de granulats HIPS [70].	39
<b>Figure I.40</b> :Coefficients de la diffusion apparent des ions chlorés du béton à différents volumes des granulats WPLA [102].	41
<b>Figure I.41</b> :Corrélation entre la sorptivité et le coefficient de la diffusion des ions chlorés des bétons contenant des agrégats WPLA [102].	41

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> :L'analyse granulométrique du sable et des agrégats d'EPVC.....	52
<b>Figure II.2</b> : (a) Les plaques d'EPVC (b) Le déchets en EPVC.....	53
<b>Figure II.3</b> : Spectre DRX des agrégats d'EPVC, (C: calcite CaCO <sub>3</sub> ).....	54
<b>Figure II.4</b> : Spectre IRTF des particules en EPVC.....	54
<b>Figure II.5</b> : Image MEB des agrégats d'EPVC.....	55
<b>Figure II.6</b> : Courbes TG/DTG des agrégats d'EPVC.....	55
<b>Figure II.7</b> : Organigramme résumant le travail expérimental mené dans cette étude.....	58
<b>Figure II.8</b> : Table d'étalement des mortiers, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'ORAN.....	59
<b>Figure II.9</b> : Presse pour mortier, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'Oran.....	59
<b>Figure II.10</b> : Dispositif pour l'essai de la résistance à la flexion.....	60
<b>Figure II.11</b> : Dispositif pour l'essai de la résistance à la compression.....	60
<b>Figure II.12</b> : Appareil d'essai d'ultrason, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'ORAN.....	61
<b>Figure II.13</b> : Eprouvettes imperméabilisées.....	63
<b>Figure II.14</b> :Schéma du dispositif de l'essai d'absorption capillaire.....	63
<b>Figure II.15</b> : Appareil ISOMET Quickline 30, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'ORAN...	64
<b>Figure II.16</b> : Four électrique, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'ORAN.....	65
<b>Figure II.17</b> : Disposition des éprouvettes dans le four.....	65
<b>Figure II.18</b> : Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 5°C/min).....	66
<b>Figure II.19</b> : Microscope optique du Laboratoire de Biologie Botanique de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.....	67
<b>Figure II.20</b> : (a) Appareil de MEB, «HITACHI TM-1000» (Laboratoire des propriétés de la matière condensée MEB/EDS) (Tlemcen). (b) Appareil de MEB, « Hirox SH-4000M » (Laboratoire LSTGP) (USTOMB) (Oran).....	68
<b>Figure II.21</b> : Appareil de DRX, (Laboratoire LCSCO) (Tlemcen).....	69
<b>Figure II.22</b> : Appareil de DRX, (Laboratoire LR3E) (Tunisie).....	69
<b>Figure II.23</b> : (a) Appareil de l'IRTF, (Laboratoire LCSCO) (Tlemcen) ; (b) Appareil de l'IRTF, (Laboratoire LR3E) (Tunisie).....	70
<b>Figure II.24</b> :Immersion totale des échantillons des composites LMEPVCs dans une solution de 5% NaCl jusqu'aux 7, 28 et 91 jours.....	71
<b>Figure II.25</b> :Echantillon avant l'immersion dans la solution NaCl à 5%.....	71
<b>Figure II.26</b> : Coupe de l'éprouvette en deux partie, le jour de l'essai.....	71
<b>Figure II.27</b> :Section transversale d'éprouvette après avoir employé 0.1 Nde l'essai d'indicateur de nitrate d'argent.....	72

## Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Maniabilité des différents mortiers.....	75
<b>Figure III.2</b> : La densité à l'état durci des mortiers légers LMEPVCs à 28 jours.....	76
<b>Figure III.3</b> : Variation de la résistance à la compression des mortiers légers LMEPVC.....	78
<b>Figure III.4</b> : Evolution du rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (i varie de 3 à 180j).....	79
<b>Figure III.5</b> : Evolution du rapport de la résistance à la compression des composites LMEPVC sur la résistance à la compression du mortier témoin NWM en fonction du temps.....	80
<b>Figure III.6</b> : Variation de la résistance à la flexion des mortiers légers LMEPVCs.....	81

## Listes des figures

---

<b>Figure III.7 :</b> Evolution du rapport de la résistance à la flexion des composites par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (i varie de 3 à 180j).....	82
<b>Figure III.8 :</b> Evolution du rapport de la résistance à la flexion des mortiers légers LMEPVC sur la résistance à la flexion du mortier témoin NWM en fonction du temps.....	83
<b>Figure III.9 :</b> Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion des mortiers légers MEPVCs.....	84
<b>Figure III.10 :</b> Corrélation entre la résistance à la compression et la densité à l'état durci après 28 jours.....	85
<b>Figure III.11 :</b> Etat des mortiers composites légers après l'essai de flexion à 28 jours.....	86
<b>Figure III.12 :</b> Images obtenues au microscope optique MOP sur la fracture des échantillons d'un mortier composite LMEPVC75 (25X) ; EPVC: PVC expansé, NA : agrégat naturel,.....	87
<b>Figure III.13 :</b> Observation au MEB du mortier témoin NWM.-CSH : silicates de calcium hydraté, NA : agrégat naturel.....	88
<b>Figure III.14 :</b> Observation au MEB d'un mortier composite LMEPVC75.ITZ: zone de la transition interfaciale, EPVC: agregats en PVC expansé.....	89
<b>Figure III.15 :</b> Superposition des spectres DRX du mortier témoin NWM, le mortier léger LMEPVC75 et l'agrégat d'EPVC.....	90
<b>Figure III.16 :</b> Superposition des spectres infrarouges des échantillons NWM, LMEPVC75 et les agrégats d'EPVC.....	91
<b>Figure III.17 :</b> L'effet de l'EPVC sur la vitesse de propagation des ondes sonores des composites LMEPVCs à 28 et 90 jours.....	93
<b>Figure III.18 :</b> Evolution du module d'élasticité dynamique des composites LMEPVCs en fonction du pourcentage d'EPVC.....	95
<b>Figure III.19 :</b> Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression à 28 jours.....	96
<b>Figure III.20 :</b> Variation de la conductivité thermique des composites LMEPVCs à 7, 28 et 90 jours.....	97
<b>Figure III.21 :</b> Variation de la capacité calorifique des composites LMEPVCs à 7, 28 et 90 jours.....	98
<b>Figure III.22 :</b> Variation de la diffusivité thermique des composites LMEPVCs à 7, 28 et 90 jours.....	99
<b>Figure III.23 :</b> Corrélation entre la conductivité thermique et la densité des composites LMEPVC à 28 jours.....	100
<b>Figure III.24 :</b> Corrélation entre la conductivité thermique et la résistance à la compression des composites LMEPVCs à 28 jours.....	101
<b>Figure III.25 :</b> La relation entre les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 28 jours.....	102

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1 :</b> Perte de masse en fonction de la température pour les mortiers composites légers LMEPVC.....	109
<b>Figure IV.2 :</b> Variation du volume des éprouvettes des composites mortiers légers LMEPVC en fonction de la température.....	110
<b>Figure IV. 3 :</b> Porosité accessible à l'eau relative des mortiers composites légers LMEPVC en fonction de la température de chauffage.....	111

## Listes des figures

---

<b>Figure IV. 4 :</b> L'UPV relatives des mortiers légers LMEPVC en fonction de la température du chauffage.....	112
<b>Figure IV. 5 :</b> Le module d'élasticité dynamique relative des mortiers légers LMEPVC en fonction de la température du chauffage.....	114
<b>Figure IV. 6 :</b> La résistance à la compression relative des composites mortiers légers LMEPVC à différentes températures.....	115
<b>Figure IV. 7 :</b> Le facteur d'endommagement des mortiers légers LMEPVC en fonction de la température du chauffage.....	116
<b>Figure IV. 8 :</b> La résistance à la flexion relative des mortiers légers LMEPVC en fonction de la température du chauffage.....	118
<b>Figure IV. 9 :</b> Corrélation entre la résistance à la compression et l'UPV des mortiers légers LMEPVC exposés aux hautes températures.....	119
<b>Figure IV.10 :</b> Etat de la surface des éprouvettes des mortiers : (a) LMEPVC75 ; (b) NWM à différentes températures d'exposition.....	119
<b>Figure IV.11 :</b> Etat des éprouvettes des mortiers : (c) NWM ; (d) LMEPVC75, à 850°C.....	120
<b>Figure IV.12 :</b> Images obtenues par MOP à 850 °C des mortiers composites : (a) NWM ; (b) LMEPVC75. NA : Agrégat naturel.....	121
<b>Figure IV.13 :</b> Observation au MEB à température ambiante 25 °C et après une cuisson à 850°C des composites : (a) NWM ; (b) LMEPVC75. NA : agrégats naturel. ....	122
<b>Figure IV.14 :</b> Superposition des spectres DRX des mortiers composites NWM et LMEPVC75 à 25°C.....	124
<b>Figure IV.15 :</b> Superposition des spectres DRX des mortiers composites NWM et LMEPVC75 à 850°C (V=5°C/min).....	124
<b>Figure IV. 16 :</b> Superposition des Spectres Infrarouges du composite NWM, LMEPVC75 à 25°C et 850°C et les agrégats EPVC à 25°C.....	125
<b>Figure IV.17 :</b> La conductivité thermique relative des mortiers composites LMEPVC.....	127
<b>Figure IV.18 :</b> La capacité calorifique relative à hautes températures par rapport à la température ambiante des mortiers LMEPVCs.....	128
<b>Figure IV.19 :</b> La diffusivité thermique relative à hautes températures par rapport à la température ambiante des mortiers LMEPVC.....	129
<b>Figure IV.20 :</b> Les pertes de masse des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 à 850°C pour des vitesses du chauffage de 5°C/min et 20°C/min.....	130
<b>Figure IV.21 :</b> Les résistances mécaniques des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 en fonction de la vitesse de chauffage à 850°C.....	131
<b>Figure IV.22 :</b> La conductivité thermique des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 en fonction de la vitesse de chauffage à 850°C.....	132
<b>Figure IV. 23 :</b> Etat des éprouvettes des mortiers : (a) LMEPVC75 ; (b) NWM à 850°C avec des vitesses de chauffage : (1) 5 °C/min ; (2) 20 °C/min.....	133
<b>Figure IV.24 :</b> La relation entre les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 25°C.....	135
<b>Figure IV.25 :</b> La relation entre les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 650°C.....	135

## Chapitre V

<b>Figure V.1:</b> Porosité accessible à l'eau des composites LMEPVCs après 28 et 90 jours de cure.....	142
<b>Figure V.2 :</b> Taux de la réduction de la porosité des différents mortiers de 28 à 90 jours de cure.....	143
<b>Figure V.3 :</b> L'absorption d'eau par unité de surface des mortiers composites LMEPVC à 28 jours.....	144
<b>Figure V.4:</b> Le coefficient d'absorption capillaire des mortiers composites LMEPVC à 28 jours.....	145
<b>Figure V.5:</b> Le coefficient de sorptivité en fonction de la résistance à la compression à 28 jours des mortiers composites LMEPVC.....	146
<b>Figure V.6 :</b> La profondeur de la pénétration des ions $Cl^-$ en fonction de la période d'immersion dans 5% en NaCl des composites LMEPVCs.....	149
<b>Figure V.7 :</b> Relation entre le coefficient apparent de la diffusion des ions $Cl^-$ et le type des mortiers composites.....	150
<b>Figure V.8:</b> La résistance à la compression en fonction du coefficient de diffusion apparent des ions $Cl^-$ des mortiers composites LMEPVC.....	151
<b>Figure V.9:</b> Le coefficient de diffusion apparent des ions $Cl^-$ en fonction du coefficient de sorptivité des mortiers composite LMEPVC.....	152
<b>Figure V.10:</b> Relation entre les différentes propriétés des mortiers légers LMEPVC.....	153



## Liste des Tableaux

### Chapitre I

**Tableau I.1 :** Propriétés de certains types des déchets légers utilisés comme agrégat ..... 17

**Tableau I.2 :** L'évaluation des propriétés des mortiers et bétons à base des agrégats légers.. 18

### Chapitre II

**Tableau II.1 :** Composition chimique du ciment CPJ-CEM II/A-L 42.5..... 51

**Tableau II.2 :** Composition minéralogique du clinker (%). ..... 51

**Tableau II.3 :** Paramètres physiques du sable utilisé..... 52

**Tableau II.4 :** Compositions chimiques de sable utilisé ..... 52

**Tableau II.5 :** Paramètres physiques des agrégats d'EPVC..... 53

**Tableau II.6 :** Composition des mortiers légers LMEPVC ..... 57

**Tableau II.7 :** Les différents cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux différents types de mortier LMEPVC.....66

### Chapitre III

**Tableau III.1:** Attribution des bandes infrarouges des mortiers NWM, LMEPC75 et 'agrégat d'EPVC.....92

**Tableau III.2 :** La qualité des mortiers composites LMEPVCs suivant l'IS 13311-1-92, à 90 jours..... 94

**Tableau III.3 :** Corrélations entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs..... 103

### Chapitre IV

**Tableau IV.1 :** La qualité des mortiers composites suivant la norme IS 13311-1-92, à 25°C et après l'exposition à une température de 650°C.....113

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques physiques des mortiers à diverses températures..... 120

**Tableau IV.3:** Attribution des bandes infrarouges des mortiers composites avant et après exposition aux différentes températures et les agrégats d'EPVC. .... 126

**Tableau IV.4:** Propriétés thermiques des mortiers LMEPVCs à température de 850°C et à une vitesse de chauffage de 5°C/min et de 20°C/min.....133

**Tableau IV.5:** Corrélations entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 650°C.....136

### Chapitre V

**Tableau V.1 :** La profondeur de la pénétration des ions Cl<sup>-</sup> après 7, 28 et 91 jours de l'immersion des mortiers LMEPVC dans 5% en NaCl.....146



### Liste des abréviations

PVC	Polychlorure de vinyle
EPVC	PVC expansé
LMEPVC	Mortiers composites légers à base des agrégats de PVC expansé
NWM	mortier contenant que l'agrégat conventionnel
C <sub>3</sub> S	Silicate tricalcique
C <sub>2</sub> S	Silicate bicalcique
C <sub>3</sub> A	Aluminate tricalcique
C <sub>4</sub> AF	Alumino-ferrite tétracalcique
CSH	Silicates de calcium hydratés
PC	Polycarbonate
PEBD	Polyéthylène à basse densité
PEHD	Polyéthylène à haute densité
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
EPS	Polystyrène expansé
PSEM	Polystyrène expansé modifié thermiquement
PET	Polyéthylène téréphtalate
PUR	Mousse du polyuréthane rigide
EVA	Ethylène-acétate de vinyle
SBR	Caoutchouc pneumatique
WPLA	Waste PET Lightweight Aggregates
HIPS	Polystyrène à haut impact
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic
RRA	Agrégats de caoutchouc recyclés
ITZ	Zone de Transition Interfaciale
UPV	Vitesse d'impulsion ultrasonique
E <sub>d</sub>	Module d'élasticité dynamique
MEB	Microscope à balayage électronique
MOP	Microscope optique
DRX	Diffraction des rayons X
IRTF	Spectrométrie infrarouge à Transformée de Fourier
TG/DTG	Analyse thermogravimétrique
HR	Humidité relative
ASTM	American society for testing and materials
NF EN	Norme européenne

### RESUME

Les déchets, d'origine plastique, constituent un des problèmes graves du XXI<sup>ème</sup> siècle. En effet, l'augmentation de la population mondiale et sa concentration dans les villes, ainsi que le développement d'équipements industriels et de biens de consommation génèrent des quantités astronomiques de résidus plastiques. La gestion des déchets plastiques s'avère donc plus qu'inévitable en vue de résoudre ce problème de pollution qui va croître d'année en année. Il est donc important de penser à l'élaboration de matériaux composites mortier-polymère à base d'agrégats légers artificiels provenant de déchets plastiques.

Ce travail fait partie d'un projet de recherche sur la valorisation des déchets plastiques composites - polychlorure de vinyle expansé - (EPVC) utilisés comme agrégats provenant des plaques de FOREX. Il apporte une contribution ayant un impact positif sur l'environnement à travers la participation de ces déchets dans la formulation des mortiers composites légers LMEPVC utilisés dans le domaine de Génie Civil. En vue d'appréhender l'influence des agrégats légers d'EPVC sur le comportement des matériaux cimentaires, une étude expérimentale a été menée sur un mortier à base de ciment et de sable silico-calcaire substitué de 0, 15, 25, 50 et 75%<sup>V</sup> par ces agrégats. Ainsi, des spécimens ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  et  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ) ont été confectionnés avec un rapport de E/C= 0,5. On a caractérisé le comportement physico-mécanique et thermique des mortiers LMEPVC à température ambiante et sous hautes températures. En plus, on a étudié la résistance chimique de ces mortiers vis-à-vis de la pénétration des ions chlorures. Afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitable, il a été nécessaire d'introduire des analyses de microstructures telles que MOP, MEB, DRX et l'IRTF. Les résultats obtenus sont encourageants et ont montré que (1) l'inclusion d'un taux de 75% en EPVC dans les mortiers composites augmente la ductilité et réduit le  $E_d$  de 66% par rapport au mortier de référence NWM ; (2) les agrégats en EPVC abaissent les propriétés thermiques, d'où, une amélioration des performances énergétiques des mortiers LMEPVC; (3) le composite LMEPVC75 conserve un taux modéré de ces propriétés malgré l'exposition à une température de 850°C ; (4) l'incorporation des agrégats d'EPVC diminue le coefficient de diffusion apparent des ions chlorures par rapport au mortier témoin NWM. L'observation au MEB révèle un faible agencement ITZ entre l'agrégat d'EPVC et la matrice cimentaire. Ces nouveaux composites semblent offrir un matériau à faible coût avec des propriétés cohérentes, par ailleurs, ils aideraient à résoudre certains problèmes de déchets solides créés par la production des matières plastiques et pourraient être un facteur d'économie d'énergie.

**Mots clés :** Déchets de Plaques de PVC expansé (Forex), Mortiers composites légers (LMEPVC), Propriétés physico-mécaniques, UPV, Module dynamique  $E_d$ , Conductivité thermique, Résistance au feu, Pénétration des ions chlorures, MOP, MEB, DRX, IRTF.

### Abstract

Plastic waste pollution is one of the major challenges of the 21st century. Indeed, the increase of the world population, and its concentration in cities, along with the development of new industrial equipment and consumer goods, is increasingly generating astronomical quantities of plastic residues. Better plastic waste management is therefore more than urgent in order to solve this problem of pollution that is worsening year after year. It is therefore important to consider the development of polymer-mortar composite materials based on artificial light aggregates from plastic waste.

This work is part of a research project on the recovery of composite plastic waste from FOREX Expanded Polyvinyl Chloride (EPVC) sheets for use as aggregates. This should have a significant environmental impact as this waste can be used in the formulation of lightweight composite mortars based on expanded polyvinyl chloride (LMEPVC) used in the field of Civil Engineering. In order to understand the influence of light EPVC aggregates on the behavior of cementitious materials, an experimental study was conducted on a mortar containing cement and silico-calcareous sand containing 0, 15, 25, 50 and 75%<sup>V</sup> of these aggregates. For this, specimens of dimensions  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$  and  $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$  were made with water to cement (W/C) ratio equal to 0.5. The physico-mechanical and thermal behavior of the formulated mortars was characterized at room temperature and at high temperatures. In addition, their chemical resistance to the penetration of chloride ions was also examined. In order to reach practically usable conclusions, it was considered necessary to introduce microstructure analyzes such as MOP, scanning electron microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (DRX) and Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy. The results obtained were encouraging since they showed that (1) the inclusion of 75% of EPVC in composite mortars increases the ductility and reduces the  $E_d$  by 66% as compared to the reference mortar (NWM); (2) EPVC aggregates improve the thermal properties to give better energy performance to LMEPVC mortars; (3) the LMEPVC75 composite retains a moderate level of these properties despite exposure to a temperature like 850 °C; (4) the incorporation of EPVC aggregates provides a lower apparent diffusion coefficient of chloride ions relative to NWM control mortar. The scanning electron microscopy reveals a weak interfacial transition zone (ITZ) arrangement between the EPVC aggregate and cement matrix. These new composites seem to offer a low cost material with interesting properties. Moreover, these materials would certainly help solve the critical problem of plastic waste disposal; they could also help save considerable amounts of energy.

**Keywords:** Expanded PVC sheets (Forex), Lightweight Composite Mortars: Physico-mechanical properties; UPV;  $E_d$  modulus; Thermal conductivity; Resistance to fire; Chloride Ion Penetration; MOP; SEM; XRD; FTIR.

تشكل النفايات البلاستيكية أحد أكبر المشاكل الأساسية في القرن الحادي والعشرين. وفي الواقع، فإن زيادة عدد سكان العالم وتركيزهم في المدن، فضلاً عن تطوير المعدات الصناعية والسلع الاستهلاكية، تولد عن هذا كميات كبيرة من النفايات. مشكل تسيير النفايات التي هي في زيادة عام بعد عام يمكن ان يحل عن طريق استبدالها بمواد البناء. من ناحية أخرى، تواجه مواد البناء الطبيعية ذات المنشأ الطبيعي استنفاداً في نهاية المطاف. لذلك من المهم التفكير في تطوير المواد المركبة خفيفة الوزن مع الركام الاصطناعي أو المعاد تدويرها من النفايات البلاستيكية.

العمل البحثي المقدم في هذه الأطروحة هو جزء من مجال معين متعلق بمواد البناء المستدامة. يساهم مساهمة في التأثير البيئي من خلال مشاركة النفايات البلاستيكية في تشكيل الخرسانة او الملاط المستخدمة في مجال البناء. بهذا المعنى، تشكل أوراق EPVC المضغوطة حجماً معتبراً من حجم النفايات البلاستيكية المنتجة سنوياً. أصبحت المواد المركبة الآن موضوعاً للبحث النظري والتجريبي، حيث أن هناك اهتماماً متجدداً في جميع أنحاء العالم باستخدام المركبات المركبة من البوليمر المركب في صناعة مواد البناء المستعملة في العمل الثانوي، كالترميم مثلاً، فضلاً عن تطبيقات محددة أخرى. في هذا السياق، يناسب عملنا، اقتراح تطوير الملاط الخفيفة (LMEPVC) على أساس مجاميع الفوركس FOREX.

هذا العمل يمثل جزء من مشروع بحث حول تدوير النفايات البلاستيكية من صفائح البولي كلورور المكثف EPVC المستخدمة كبديل للحصويات الطبيعية وهذا ما يعطي تأثيراً إيجابياً على البيئة ويساهم في تحسين سلوك ملاط خفيف الوزن المستعمل في مجال الهندسة المدنية. تم الشروع في سلسلة من الاختبارات التي تعطي مجموعته خمس تركيبات من عينات (16×4×4 سم<sup>3</sup> و 5×5×5 سم<sup>3</sup>) بنسبة (E/C=0.5) حيث تم استبدال الرمل الطبيعي ب 75,50, 25, 15,0% بحصى ال EPVC وقمنا بدراسة الخصائص الميكانيكية، الحرارية و ديمومة الملاط الناتج عن هذه الصبغ على المدى القريب والبعيد.

لفهم تأثير المجاميع البلاستيكية المكثفة خفيفة الوزن (EPVC) على سلوك المواد الإسمنتية، أجريت دراسة تجريبية على ملاط اسمنتي والرمل بديلاً مع محتويات مختلفة في حجم EPVC. تم وصف السلوك الفيزيائي الميكانيكي والحراري للملاط LMEPVC في درجة حرارة عادية وعند درجات الحرارة المرتفعة. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة اختراق أيونات الكلوريد في هذا الملاط المركب. وللوصول إلى استنتاجات قابلة للاستخدام عملياً، كان من الضروري إدخال تحليلات للبنى المجهرية مثل DRX و FTIR و MOP و MEB. وتحدد هذه التحليلات آثار دمج EPVC على مصفوفة الاسمنت والتلاصق أو الالتصاق بالمجموعة داخل الملاط المركب. النتائج على مستوى المختبر مشجعة وأظهرت أن 1- استخدام نفايات EPVC في الملاط المركب LMEPVC75 يزيد من الليونة ويقلل Ed بنسبة 66% مقارنة بالملاط المرجعي NWM. 2- استبدال الحصويات الطبيعية بحصويات EPVC ينقص الناقلية الحرارية مما يؤدي الى الريح في الطاقة. 3- المركب LMEPVC75 يحافظ على اغلب خصائصه رغم تعرضه لدرجة حرارة 850 م. 4- استبدال الحصويات الطبيعية بحصويات EPVC يمنع شوارد الكلور من التغلغل الى داخل الملاط المركب. الصور المأخوذة عن طريق ال MEB توضح رابطة ضعيفة بين حصويات ال EPVC و المصفوفة الاسمنتية. المركب الناتج يمكن تحصيله بكلفة اقل ويبيدي مردود جيد، وبالإضافة الى ذلك فهو يقضي على النفايات بإنتاج مواد مقتصدة للطاقة.

**الكلمات المفتاحية:** نفايات رقائق البلاستيك الممددة (EPVC)، الملاط المركبة الخفيفة (LMEPVC)، الخواص الفيزيائية و الميكانيكية، الامواج فوق الصوتية، الوحدة الديناميكية، الموصلية الحرارية، مقاومة الحرائق، اختراق شوارد الكلور، MOP, MEB, DRX, IRTF.

*Introduction générale*

### INTRODUCTION GENERALE

Au cours de ces dernières années, les déchets de différentes sources sont à l'origine de divers problèmes environnementaux liés à leur stockage et leurs quantités croissantes. Par ailleurs, les matériaux de construction traditionnels d'origine naturelle sont confrontés, à terme, à l'épuisement.

Le plastique est l'une des innovations les plus importantes du 20<sup>ème</sup> siècle, c'est un matériau omniprésent. Ces dernières années et en raison de ses avantages liés à son coût, sa légèreté, la facilité de son utilisation, sa force et sa longue durée de vie sont les facteurs qui font qu'une croissance, substantielle de la consommation de plastique est observée partout dans le monde ; ce qui augmente également la production de ses déchets.

Actuellement, il existe plus de 700 types de plastiques aux noms que les chimistes sont les seuls à pouvoir encore prononcer correctement. Dans l'usage quotidien, la plupart de ces matières reçoivent le nom de 'plastique' (Polystyrène, polymères acryliques, chlorure de polyvinyle, polyéthylène, polyuréthane, polytétrafluoroéthylène, polyesters, silicones, résines époxy, polycarbonates, polypropylène, polyéthylène téréphtalate,...etc.).

En outre, une longue série de fonctions nouvelles ne peuvent être remplies aujourd'hui que par les plastiques. Certaines sont très quotidiennes, d'autres, par contre, sont véritablement 'high-tech'. Les emballages représentent, et de loin, la majeure partie des utilisations.

D'autres applications des plastiques se retrouvent notamment dans les vêtements, les automobiles, les bicyclettes, les appareils ménagers, le bâtiment, les revêtements de sol, les jouets, les téléphones mobiles, les ordinateurs et les plaques publicitaires.

La gestion de déchets plastiques est l'un des principaux soucis environnementaux dans le monde. Avec le rétrécissement des espaces pour la mise en décharge et en raison de son coût toujours croissant, l'utilisation de déchets est devenue une alternative attrayante mise à disposition pour diverses applications.

Le souci majeur des professionnels dans le domaine des matériaux de construction est d'améliorer les propriétés induites par l'ajout des différents déchets plastiques et parfois de les adapter à une application particulière. Pour cela, les démarches adoptées consistent à identifier le rôle et les effets induits par la présence de cette phase.

Dans le domaine de valorisation des déchets, les déchets des plaques en PVC expansé de FOREX constituent un pourcentage non négligeable du volume de déchets plastiques produits annuellement. Les matériaux composites font aujourd'hui l'objet de recherche tant théorique qu'expérimentale, car un regain d'intérêt se manifeste dans le monde pour l'utilisation des composites mortier-polymère ou agrégats composites dans l'industrie du bâtiment comme matériau de second œuvre, de restauration ainsi que d'autres applications spécifiques. Dans ce contexte, notre travail s'inscrit, en proposant l'élaboration des mortiers composites légers (LMEPVC) à base des agrégats de FOREX pour la production des matériaux de construction verts.

En vue d'appréhender l'influence des agrégats légers de PVC expansé (EPVC) sur le comportement des matériaux cimentaires, une étude expérimentale a été menée sur un mortier à base de ciment et de sable silico-calcaire substitué de différents teneurs en volume d'EPVC. On a caractérisé le comportement physico-mécanique et thermique des mortiers LMEPVC à température ambiante et sous hautes températures. En plus, on a étudié la pénétration des ions chlorures au sein de ces mortiers composites. Afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitable, il a été nécessaire d'introduire des analyses de microstructures telles que : MOP, MEB, DRX et l'IRTF. Ces analyses identifient les effets de l'incorporation de l'EPVC sur la matrice cimentaire et la jonction ou l'adhérence « agrégat-matrice » au sein d'un mortier composite.

Le contenu de ce travail de recherche est scindé en cinq parties, des conclusions, des recommandations, des perspectives et une liste bibliographique.

Dans le premier chapitre, on dresse une revue bibliographique brève des recherches relatives à la caractérisation du comportement de divers composites légers. Toute une partie est consacrée aux recherches et développement dans la conception et l'application des agrégats légers revalorisé dans le béton et/ou mortier jusqu'aux ultimes résultats recueillis par différents chercheurs nationaux et internationaux qui ont marqués ce secteur de recherches.

Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes d'essais pour la mise en œuvre des mortiers composites LMEPVC, puis aux choix et à la description des modes opératoires employés et la description des matériaux utilisés et leurs caractérisations.

Le troisième chapitre présente les résultats des essais expérimentaux et leurs analyses. D'abord, ceux concernant l'influence de l'agrégat léger EPVC sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des mortiers LMEPVC à température ambiante. Ensuite,

## **Introduction générale**

---

des analyses complémentaires telles que le MOP, le MEB, la DRX et l'IRTF qui ont permis d'aboutir à des informations sur la microstructure de ces composites, ainsi que, l'agencement entre l'EPVC et la matrice cimentaire.

Le quatrième chapitre porte sur l'influence des agrégats EPVC sur le comportement des mortiers composites LMEPVC soumis à des hautes températures jusqu'à 450, 650 et 850 °C. On cherche à déterminer l'évolution de différentes propriétés physiques, thermiques (conductivité thermique, chaleur massique et diffusivité) et mécaniques. On présente, aussi, la progression de la fissuration, la perte de masse et l'évolution de la porosité après les différentes sollicitations thermiques. Ces caractéristiques permettent d'évaluer l'état de dégradation des mortiers LMEPVC, et notamment la qualité des interfaces pâte - granulat ou ancienne pâte - nouvelle pâte. L'identification microstructurale des mortiers LMEPVC soumis à des hautes températures ont été suivi par MOP, MEB, DRX et IRTF.

Le cinquième et dernier chapitre de ce travail, présente l'étude du comportement des mortiers composites légers à base des agrégats de PVC expansé vis-à-vis des attaques chimiques (pénétration des ions chlorures).

Enfin, nous clôturons ce travail par des conclusions générales et nous y rappelons les principaux résultats obtenus et la complémentarité entre les différents sujets abordés, ainsi que des perspectives.





*Chapitre I*

*Revue Bibliographique*

## I.1. Introduction

La synthèse bibliographique de ce chapitre a pour objet de définir les enjeux de cette thèse. Dans ce chapitre une synthèse des connaissances est faite sur les matériaux qui ont un lien avec cette étude, pour qu'elle soit suffisante à la compréhension et aux analyses proposées. On a présenté certaines généralités sur les éléments qui sont essentiels à la compréhension de l'ensemble des phénomènes intéressants.

La première partie présente certains constituants que nous avons utilisés dans cette étude citant ; le ciment Portland artificiel et les superplastifiants.

Toute une partie est consacrée aux recherches et au développement dans la confection et l'application des agrégats légers revalorisés dans le béton et/ou mortier avec les résultats fournis par les différents remarquables chercheurs que ce soit à l'échelle nationale ou internationale.

## I.2. Le ciment Portland

Le ciment Portland est une poudre minérale, dont la propriété est de durcir au contact de l'eau. De ce fait, il est appelé liant hydraulique. Ce dernier est obtenu par le broyage du clinker et de sulfate de calcium. Le clinker est issu de la cuisson à haute température (1450°C) d'un mélange de 20% d'argile et 80% de calcaire [1]. Au besoin, du minerai de fer, de la bauxite et du sable sont ajoutés à ce mélange afin d'obtenir la composition désirée. A l'issue de cette cuisson, le clinker est broyé avec environ 5% de sulfate de calcium. Ce sulfate de calcium permet de réguler l'hydratation du ciment. Il peut se présenter sous forme de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), d'hémihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) ou de mélange des deux. Le gypse est souvent associé à de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ).

Ces différents minéraux sont des sources de chaux  $\text{CaO}$ , de silice  $\text{SiO}_2$ , d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de ferrite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ce qui explique que les principaux constituants du ciment Portland soient:

- Le silicate tricalcique  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,
- Le silicate bicalcique  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,
- L'aluminate tricalcique  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- Le ferroaluminate tétracalcique  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

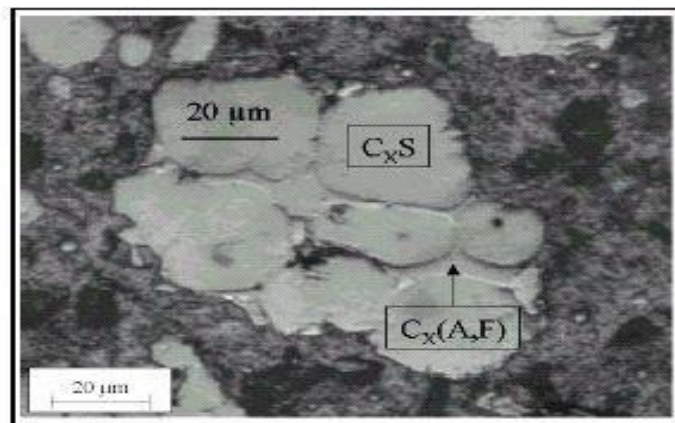
Les silicates représentent 80% en masse de la composition du ciment tandis que les aluminates sont présents à hauteur de 20% en masse.

Afin de simplifier les écritures, les différentes phases minérales du ciment s'écrivent dans la nomenclature utilisée communément dans la chimie du ciment  $\text{C}_3\text{S}$  (alite) pour le

$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$  (bélite) pour le  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  pour le  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  pour le  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Le grain de ciment, obtenu par broyage du clinker, est en fait un matériau composite constitué de silicates agglomérés et d'aluminates placés en interstitiels (Figure I.1).

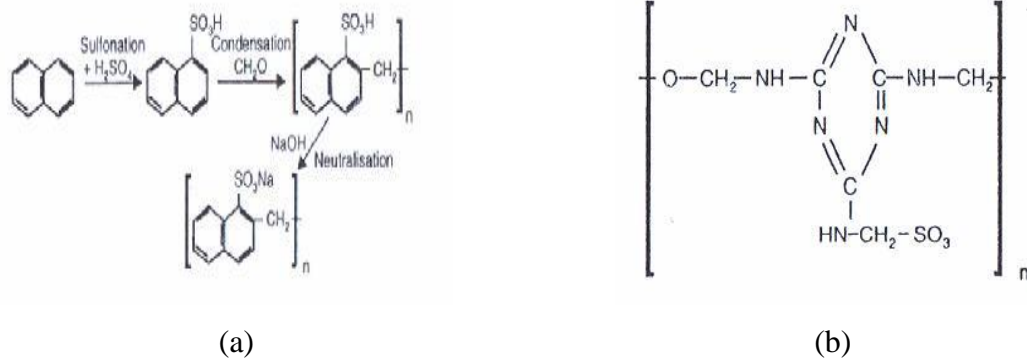
Le ciment Portland a des propriétés hydrauliques : il est capable de réagir avec l'eau pour former un matériau cohésif : c'est le cas de la pâte de ciment hydraté. Cependant, Il existe d'autres types de ciment qui diffèrent du ciment Portland par leur composition et leurs propriétés. Le ciment est utilisé essentiellement comme liant de matériaux granulaires, dans le cas de mortiers ou de bétons. On utilise le terme de liant hydraulique, lorsqu'on veut souligner ses propriétés hydrauliques, ou liant cimentaire, pour pâte de ciment hydraté. De plus, lorsqu'on considère un mortier ou un béton comme l'assemblage composite de granulats noyés dans une matrice, on parle aussi de matrice cimentaire.



**Figure I.1** : Une section polie de mortier au microscope optique (x500).  
( $\text{C}_x\text{S}$ ) : les silicates et ( $\text{C}_x(\text{A}, \text{F})$ ) : les aluminates [2].

### I.3. Les superplastifiants

Les superplastifiants sont apparus à la fin des années 1970 au Japon et en Allemagne. Ce sont généralement des sels sulfoniques de formaldéhydes, naphthalènes ou mélamines [3], qui ont la propriété de pouvoir améliorer notablement la fluidité d'une gâchée, et donc de diminuer la quantité d'eau nécessaire à sa mise en œuvre.

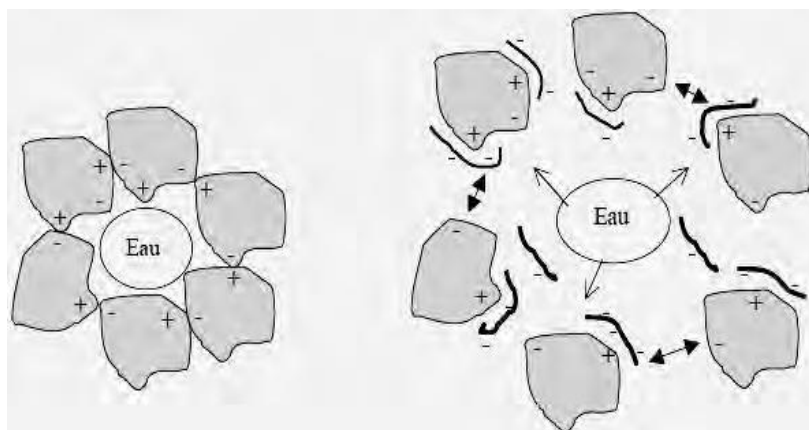


**Figure I.2 :** Représentation schématique d'une molécule d'un superplastifiant à base de (a) Sels de sodium de poly-naphtalène sulfoné (b) Polymélamine sulfoné [3,4].

Les superplastifiants sont des polymères solubles dans l'eau, lesquels possèdent de nombreuses applications dans l'industrie de la construction [3,4]. Ces matériaux sont également appelés réducteurs d'eau de haut rang.

Il existe différents types de superplastifiant communément utilisés dans les matériaux de construction. Ils se différencient principalement par la nature des groupements anioniques portés par le polymère et par la façon dont ils engendrent une force répulsive entre les grains de ciment. Toutefois, quelle que soit leur nature, les superplastifiants apportent sans conteste des améliorations technologiques aux bétons qui les incorporent dans leur formulation.

L'action principale des superplastifiants est de défloquer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques qui se présentent à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues (Figure I.3).



**Figure I.3 :** Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [4].

#### I.4. L'impact des déchets plastiques sur l'environnement

Les plastiques sont devenus une partie inséparable et intégrale de notre vie, la quantité de plastiques consommés annuellement s'est développée considérablement. La légèreté, la résistance, la conception facile, la durabilité, et son coût bas sont les facteurs derrière une telle croissance phénoménale de leurs utilisations.

Selon un rapport de l'agence américaine de l'environnement de l'année 2003, 80% des déchets plastiques sont envoyés à l'enfouissement, 8% sont incinérés et seulement 7% sont recyclés.

La production mondiale de plastique en 2012 aurait atteint 288 millions de tonnes [5]. Plus de la moitié de cette quantité a été utilisée pour des produits de consommation jetables, ce qui a contribué à la production de déchets liés aux matières plastiques. La plupart des types de plastiques ne sont pas biodégradables et sont chimiquement non réactifs dans l'environnement. Certains types de plastiques tels que le polychlorure de vinyle (PVC) et le polycarbonate (PC) peuvent libérer lentement des composés toxiques dans l'air. Zhou et al. [6], Papong et al. [7], Badia et al. [8], ont révélé que des milliers d'années sont nécessaires pour la biodégradation des plastiques. Cela entraîne l'accumulation de déchets plastiques et provoque des graves problèmes environnementaux dus à leur mise en décharge et leur enfouissement illégal ou leur incinération.

Par conséquent, les déchets plastiques sont considérés comme un problème environnemental sérieux universellement. La production du plastique comprend également l'utilisation des produits chimiques potentiellement nocifs, qui sont ajoutés comme stabilisateurs ou colorants. Beaucoup d'entre eux n'ont pas subi une évaluation des risques environnementaux et leur impact sur la santé humaine et l'environnement, sont actuellement incertain, à titre d'exemple les phtalates, qui sont employés dans la fabrication de PVC.

Avec de plus en plus de produits plastiques, en particulier les emballages, étant débarrassé peu de temps après leur achat, les espaces d'enfouissement requis pour les déchets plastiques sont une préoccupation croissante.

Le plus grand composant de ces déchets plastiques est le polyéthylène à basse densité à environ 23% (PEBD), suivi de 17,3% du polyéthylène à haute densité (PEHD), 18,5% de polypropylène (PP), 12,3% du polystyrène (PS), 10,7% du polychlorure de vinyle (PVC), 8,5% polyéthylène téréphtalate (PET) et 9,7% d'autres types de déchets [9].

Actuellement, les produits polymères sont largement utilisés dans presque tous les domaines, en particulier dans les domaines de l'emballage, de l'automobile, de l'électricité, de

la construction, de l'électronique, l'agriculture et d'autres industries. Subramanian [10] a signalé que les plastiques représentent un faible taux de la quantité des déchets mais qui est très significative.

Dans notre pays, la production de déchets ménagers est estimée à 9 millions de tonnes par an. Ce chiffre est en constante augmentation. Les estimations chiffrées font état de 0,8 kg/habitant/jour et ont atteint 1 kg/habitant/jour pour l'agglomération de grandes villes. En Algérie et partout dans le monde, l'utilisation de produits emballés a induit une augmentation des déchets de matières plastiques et une difficulté de leur enfouissement ou retrait [11].

### **I.5. La gestion des déchets plastiques**

La gestion des déchets plastiques s'avère donc plus qu'inévitable en vue de pallier ce problème de pollution qui ne cesse de croître d'années en années. Toutefois, cela nécessite la mise en place des filières de traitement ou de valorisation des déchets. Parmi les difficultés de transformation qui nécessite une main d'œuvre qualifiée, mais cela n'entrave en principe nullement d'engager une politique de gestion et de valorisation des déchets pour limiter les dégâts écologiques.

De nombreux travaux de recherche ont été menés à travers le monde sur l'utilisation des produits plastiques. Ce domaine de recherche occupe une place importante dans le contexte des matériaux de construction durables [11]. Dans ce contexte, les déchets plastiques tels que le polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle (PVC), le caoutchouc, sont utilisés comme agrégats dans les mortiers et bétons. L'Algérie reste loin derrière la plupart des pays en termes de recherches et d'applications des matériaux de construction durables tels que la substitution des agrégats par les plastiques dans le béton ou mortier.

Toutefois, l'absence de procédés de transformation de ces matériaux peut fortement empêcher leur application dans le domaine de la construction. L'utilisation des déchets plastiques dans le domaine de la construction peut jouer un rôle important dans le contexte économique du pays.

Ces matériaux sont dénommés Composite de Béton-Polymère (CPC) et Composite de Mortier-Polymère (PCM) ou, respectivement en anglais, Concrete-Polymer Composites (CPC) et Mortar Polymer Composite (MPC) [12].

La substitution des agrégats naturels par les plastiques dans un mortier ou béton permet d'améliorer une partie des propriétés essentielles (caractéristiques mécaniques,

propriétés thermiques, durabilité, masses volumiques, etc.....) et de répondre au mieux aux problèmes technico-économiques que le matériau classique.

## **I.6. Les déchets légers et leurs applications dans le domaine de Génie civil**

Parmi les différents types d'approches de la gestion des déchets, on cite la réutilisation des déchets et des matières plastiques recyclées dans l'industrie de la construction, qui est considérée comme une méthode idéale pour l'élimination des déchets plastiques.

Divers types des matières recyclables d'origine industrielle sont actuellement utilisées dans les applications de génie civil telles que : les particules de déchets polymériques (caoutchouc [13], le polychlorure de vinyle PVC [14, 15], le polyéthylène téréphtalate PET [16-18], les fibres de PET [19], le polyéthylène à haute densité PEHD [11, 20], la mousse du polyuréthane rigide PUR [21]...etc.), la céramique [22], le polystyrène expansé PSE [23, 24], le bois [25], le verre [26, 27], le liège [28, 29], les fibres d'acier [30], les coproduits issus de l'exploitation agricole (lin [31], olive [32], coquille de riz [33], jute [34], fibre de palmier [35,36]...etc.). Chacun de ces déchets a donné un effet spécifique sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci.

L'utilisation des matériaux plastiques dans le mortier et le béton a fait l'objet de nombreuses recherches. Dans le passé, les plastiques étaient principalement utilisés dans le béton sous deux formes: (1) les granulats plastiques, qui remplaçaient les granulats naturels et (2) les fibres plastiques, utilisés dans le béton fibré. Par ailleurs, les matériaux de construction traditionnels d'origine naturelle sont confrontés, à terme, à l'épuisement. Il est donc important de penser à l'élaboration de matériaux composites à base des agrégats légers provenant des déchets industriels et agricoles.





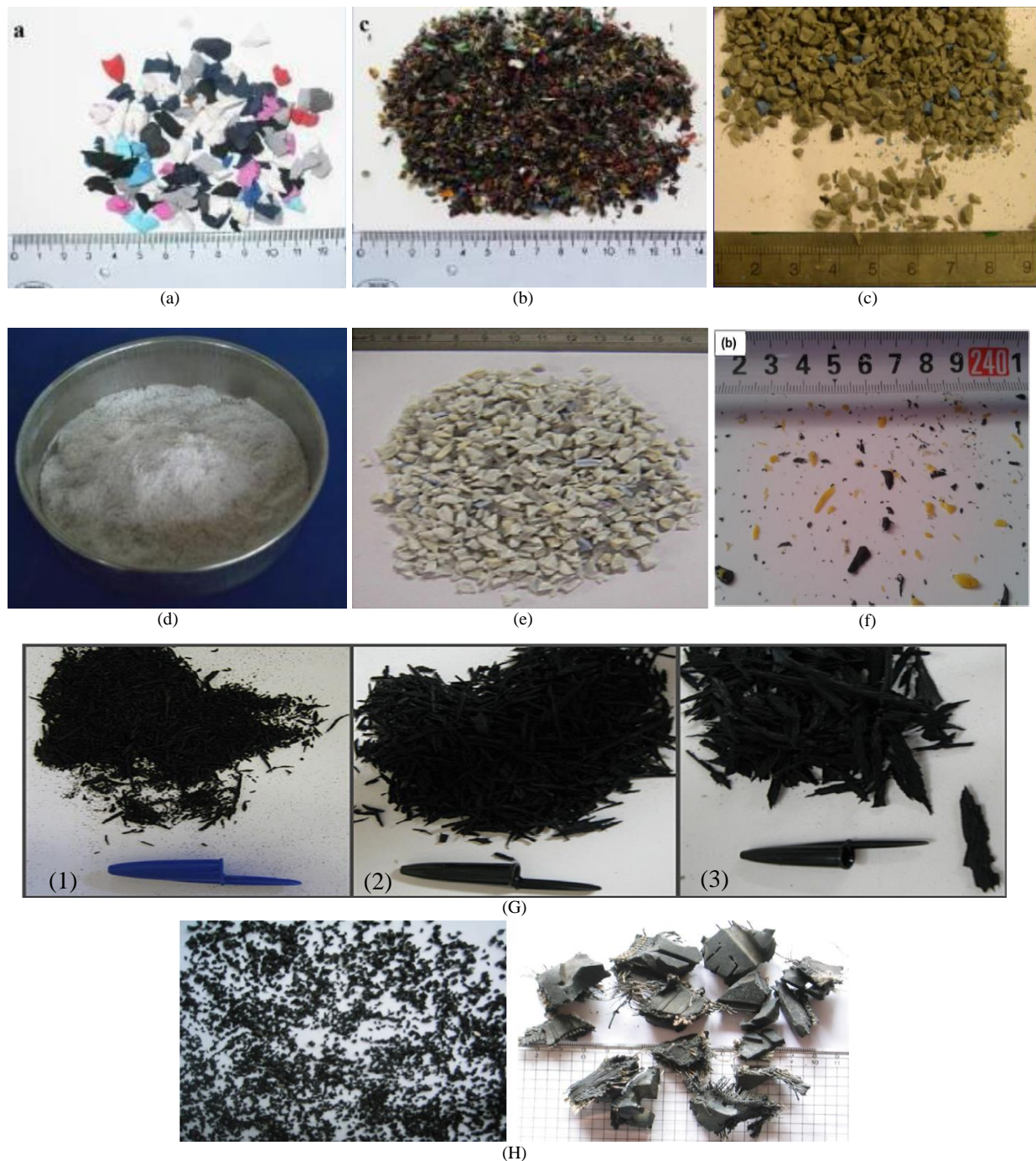
**Figure I.4 :** Certains types des matières recyclables d'origine industrielle utilisées dans les applications en génie civil : (1) Polyéthylène téréphtalate (PET) [37] (2) Déchets des pièces plastiques électroniques [38] (3) Chaussures en caoutchouc [39] (4) Poudre de liège [29] (5) Agrégat de PVC [40] (6) Les déchets de bois [25] (7) Mousse de verre [41] (8) Polystyrène expansé (PSE – bille découpée) [42] (9) Mousse de polyuréthane extrudé rigide (PUR) [42].

La croissance de l'utilisation des déchets comme des agrégats légers (LWA) est due à ses propriétés bénéfiques. Le remplacement des agrégats naturels par des agrégats des déchets légers diminue généralement les densités de béton/mortier [24, 32,40].

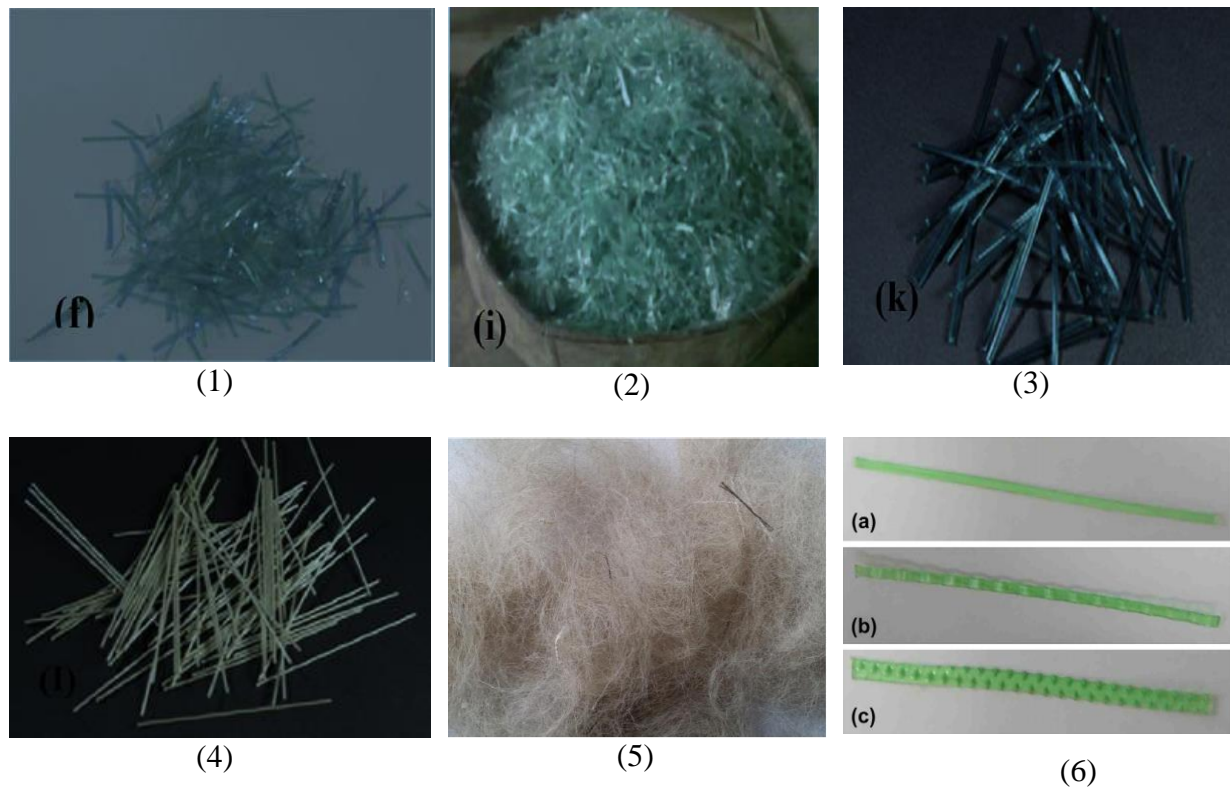
Le but de fabrication des composites mortier-polymère est de profiter des bonnes propriétés de chaque matériau afin de l'adapté à certaines applications. Un composite est usuellement constitué des agrégats et d'une matrice. On distingue les composites à base des agrégats et les composites à base des fibres.

Une vaste étude a été menée pour étudier l'utilisation de diverses formes des plastiques dans le béton ou mortier comme le montre les figures (I.5, I.6).





**Figure I.5 :** Type des agrégats plastiques utilisés dans le béton / mortier. (a) Ethylène-acétate de vinyle - (EVA) (4/8 mm) [43], (b) Câbles en polychlorure de vinyle (PVC) (0/4 mm) [43], (c) Tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) (<5 mm) [15], (d) Polyéthylène téréphtalate (PET) (<1mm) [16], (e) Polycarbonate (PC) (<5mm) [37], (f) Polyéthylène à haute densité (PEHD) [44], (G) Caoutchouc pneumatique (SBR) (1)- (1/2 mm) (2)-(2/4 mm) (3)-(4/8 mm) [45],(H) Caoutchouc pneumatique – à gauche (agrégats) / à droite (déchets) [46].



**Figure I.6 :** Type des fibres plastiques utilisées dans le béton / mortier. (1) Fibres de PET laminaires courtes [47], (2) fibre de PET coupée à la main [48], (3,4) PET [49], (5) fibre de déchets de moquette [50], (6) fibres de PET de longueur de 50 mm: (a) type droit (section transversale  $0,5 \times 1$  mm), (b) type serti (section transversale  $0,3 \times 1,2$  mm), (c) type en relief (section transversale  $0,2 \times 1,3$  mm) [51].

### I.7. Les plaques de PVC expansés « FOREX »

Le polychlorure de vinyle (PVC) est l'un des polymères les plus utilisés dans le monde. Le PVC a été l'un des premiers matériaux plastiques modernes découverts. Synthétisé pour la première fois en laboratoire au XIX<sup>e</sup> siècle, il n'a été commercialement exploité qu'à partir du milieu des années 1920 pour avant de connaître un développement spectaculaire dans les années 1950. Il y a plus d'un demi-siècle, le polychlorure de vinyle, ou PVC, montait dans le train de la réussite. Depuis, ce matériau innovant compte parmi les polymères synthétiques les plus connus et il est devenu l'une des principales matières plastiques [52].

Grâce à des procédés de fabrication et de mise en œuvre innovants, à la gestion raisonnable de l'énergie et des ressources qu'il permet, mais aussi de par la richesse de la gamme de ses applications, le PVC contribue au développement durable sur tout son cycle de vie; autant d'avantages qui se traduisent par la progression permanente de la demande de ce plastique.



Avec une production annuelle de 28,6 millions de tonnes, le PVC est le troisième plastique le plus produit au monde. Seul le polypropylène avec 35,4 millions de tonnes et le polyéthylène avec 57,2 millions de tonnes le précèdent à cet égard. L'importance du PVC s'illustre par les pourcentages de production relatifs des matières plastiques pour l'année 2004 indiqués ci-dessous [52].

En raison de sa polyvalence, le PVC a trouvé ses applications dans une large gamme d'usages industriels, techniques et domestiques. Les deux tiers environ du PVC produit sont utilisés dans la construction : cadres de fenêtres et autres profilés, tuyaux et raccords, revêtements de sols, câbles et gaines électriques, revêtements plastiques, membranes, applications d'étanchéité et tissus enduits, etc.

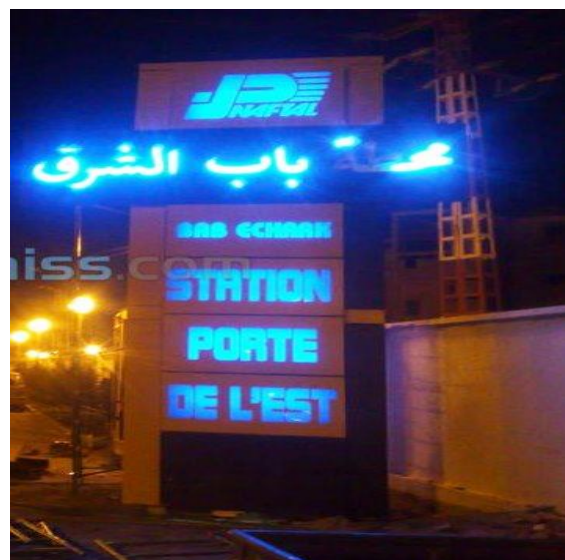
D'autres applications importantes incluent les plaquettes thermoformées, plateaux et films d'emballage, les garnitures intérieures et extérieures des véhicules dans le secteur automobile, une large gamme de meubles, produits de loisir et vêtements imperméables, ainsi que des dispositifs médicaux.

Le FOREX est l'appellation commerciale la plus connue de PVC expansé. Le FOREX est un panneau en plastique rigide (PVC) légèrement expansé avec une structure cellulaire fermée particulièrement fine, homogène et des surfaces soyeuses [53].

Les plaques de PVC expansé (FOREX) sont idéales en usage intérieur et extérieur dans le domaine de la publicité, de la construction et de l'industrie (Figure I.7, I.8).



**Figure I.7 :** Décoration des magasins par des plaques de FOREX .



**Figure I.8 :** Panneau de FOREX pour la signalisation.

Les panneaux en PVC expansé (FOREX) sont des produits imputrescibles, légers et rigides à la fois. Il est faiblement perméable à l'eau et possède une forte résistance chimique et une faible conductivité thermique (0.081 W/m. K). Ces plaques en PVC expansé ont une densité 2 à 3 fois plus faible que celles en PVC massif [53].

Le FOREX est en effet souvent utilisé sous forme d'enseignes ou de panneaux publicitaires de plus ou moins grande taille. Grâce à sa polyvalence, on le retrouve également dans la scénographie et la décoration des magasins, par exemple sous forme de présentoirs ou de formes à suspendre pour vitrines. À la résistance s'ajoute la légèreté. Ce matériau est donc facilement transportable et simple à installer. Le FOREX est un matériau particulièrement résistant [53]. Contrairement au carton, par exemple, le FOREX étant un plastique, il résiste aux éléments atmosphériques comme la pluie, ce qui le rend adapté à une utilisation extérieure sous forme de panneaux publicitaires. Pour une utilisation extérieure, nous recommandons d'utiliser des panneaux de Forex plus épais, à partir de 10 mm. En outre, le FOREX est un matériau résistant à l'usure: il ne se déforme pas et ne perd pas sa forme initiale, même sous forme de panneaux de grandes tailles. Si le panneau reste exposé en permanence au soleil, les images auront tendance à s'éclaircir progressivement au fil du temps [53].

Le FOREX est proposé en 10 épaisseurs allant de 1 à 19 mm, les épaisseurs les plus vendues étant de 3, 5 et 10 mm. Les panneaux de FOREX sont disponibles en 9 couleurs, mais la couleur blanche originale reste la plus facilement imprimable. Il présente un bon rapport qualité-prix. Il peut être une solution plus économique pour certains usages par rapport aux matériaux plus coûteux comme le Plexiglas ou l'aluminium .



**Figure I.9 :** Les plaques de FOREX.



**Figure I.10 :** La figuration des plaques de FOREX.

La facilité à travailler sur les plaques de FOREX permet de faire plusieurs finitions, telles que la coupe ou le fraisage. Les panneaux peuvent également être incurvés à froid ou à chaud, ou forés pour permettre l'ajout de vis ou de crochets métalliques facilitant leur installation.

Le but de cette thèse est d'expliquer l'apport du PVC expansé (FOREX) en tant qu'agrégats dans le mortier. En ce sens, nous passerons en revue une étude bibliographique sur les matériaux cimentaires composites à base des matières plastiques. L'état de connaissance s'appuiera aussi sur des travaux effectués sur le comportement des mortiers ou bétons et leurs caractéristiques essentielles. Un inventaire de différentes recherches dans le domaine de la valorisation des agrégats légers sera aussi présenté.

### **I.8. Types et quantités de substitutions des agrégats naturels par des agrégats légers dans le mortier / béton**

Les agrégats légers sont généralement produits à partir de grandes quantités de déchets des matières à basse densité. Les substitutions partielles et totales des granulats naturels par des granulats légers ont été signalées dans différentes références. Le Tableau I.1 met en évidence les types et les quantités de substitution de granulats naturels par les agrégats légers dans la préparation de mortier et béton.

Tableau I.1 : Propriétés de certains types des déchets légers utilisés comme agrégat.

Référence	Type de granulats	Taille des particules	Origine de granulats	Densité	Composite	Type et taux de substitution
Benazzouk et al. [13]	Caoutchouc	$\leq 1$ mm	Pneus usagers	0,180	Mortier	Agrégat fin, 25%, 50% 75% et 100% du volume
Corinaldesi et al. [39]	Caoutchouc	$\leq 8$ mm	Semelles en caoutchouc	0,58	Mortier	Agrégat, 10% et 30% du volume
Kou et al. [15]	PVC	$\leq 5$ mm	Plastique	1,4	Béton	Agrégat, 5%, 15%, 30% et 45% du volume
Senhadji et al. [14]	PVC	$3\text{mm} \leq d \leq 8\text{mm}$	Tuyaux de PVC	1,44	Béton	Agrégat, 30%, 50%, et 70% du volume
Choi et al. [54]	WPLA	$\leq 0.15$ mm	Bouteilles en PET	1,39	Mortier/Béton	Agrégat, 25%, 50%, et 75% du volume
Albano et al. [55]	PET	$0.26\text{cm} \leq d \leq 1.14\text{cm}$	Bouteilles en PET	-	Béton	Agrégat fin, 10% et 20% du volume
Saikia et al. [56]	PET	$4\text{mm} \leq d \leq 11.2\text{mm}$	Bouteilles en PET	1,34	Béton	Agrégat, 5%, 10%, et 15% du volume
Akçaözöglü et al. [18]	PET	$\leq 4$ mm	Bouteilles en PET	1,27	Béton	Agrégat, 20% -100% du volume
Benosman et al. [16]	PET	$\leq 1$ mm	Bouteilles en PET	1,35	Mortier	Agrégat, 2.5%, 5.0% et 7.5%
Babu et al.[57]	EPS	$4.75\text{mm} \leq d \leq 6.3\text{mm}$	polystyrène expansé	0,029	Béton	Agrégat grossier, 16.3 –66.5% du volume
Herki et al. [23]	EPS	$\leq 8$ mm	polystyrène expansé	0,8	Béton	Agrégat fin, 60% et 100% du volume
Ismail et al.[60]	PEHD	$\leq 2.36$	PEHD	1,04	Béton	Agrégat fin 2%, 4% et 6% du volume
Kumar et al. [58]	PEHD	$\leq 3.15$ mm	tuyaux (PEHD)	0,922	Mortier	Agrégat, 15%, 30%, 45% et 60% du volume
Yacine et al. [22]	céramique	$\leq 5$ mm	Sanitaire	1,28	Mortier	Agrégat, 10%, 20%, 30%, 40% et 50% du volume
Corinaldesi et al. [25]	Bois	$\leq 10$ mm	copeaux de bois	0,64	Mortier	Agrégat, 2.5%, 5%, et 10% du volume
Matos et al. [28]	Liège	-	bouchons de bouteille.	0,079	Béton	1.06 - 8.57% du volume de ciment
Binici et al. [32]	Olive/ PVC /bois	-	Graines d'olive/ cadres de fenêtre / copeaux de bois	-	Mortier	-
Raut et al. [36]	Palmier	$\leq 10$ mm	Cendre volante à l'huile de palmier	0,22	Mortier	0.5%,1%,1.5% du volume
Senthil Kumar et al.[38]	E-plastic	$\leq 12.5$ mm	Déchets des pièces électroniques	0,595	Béton	Agrégat, 10%, 20%, 30%, 40% et 50% du volume
Usahanunth et al. [59]	Bakélite	$\leq 5$ mm	Déchets de bakélite	1,30–1,40	Mortier	Agrégat, 20%, 40%, 60%, 80% et 100% du volume

### I.9. Evaluation des propriétés des mortiers/bétons à base des agrégats légers

Les propriétés des déchets plastiques, pour être utilisé comme un agrégat dans les préparations des bétons et mortiers telles que la distribution granulométrique, la densité apparente, et l'absorption de l'eau ont été généralement évaluée dans la majorité des études publiées. L'évaluation de la distribution granulométrique des agrégats en plastique a été faite en général par des méthodes classiques de tamisage [15, 60, 61].

Toutefois, dans certaines études, des approches légèrement différentes ont été adoptées [21, 55]. A partir des expériences des auteurs [56], on peut affirmer que les procédures standards utilisées pour évaluer les propriétés telles que la densité absolue et l'absorption d'eau des fines et grossières granulats naturels peuvent être utilisés pour évaluer les propriétés des agrégats en plastique avec des légères modifications. D'autre part, d'autres propriétés telles que la résistance à la traction et de compression, le module d'élasticité des granulats en plastique, la température de décomposition, les températures de fusion et de dégradation initiales, la capacité calorifique et la conductivité thermique ont également été signalées.

La maniabilité, la densité du béton/mortier à l'état frais, les propriétés des différentes résistances et les modules d'élasticité du béton/mortier à l'état durci sont évalués avec quelques propriétés de durabilité et d'autres propriétés spécifiques telles que le comportement au feu, l'isolation thermique. Le tableau I.2 illustre les propriétés de certains types de plastique utilisés comme agrégats.

**Tableau I.2 :** L'évaluation des propriétés des mortiers et bétons à base des agrégats légers.

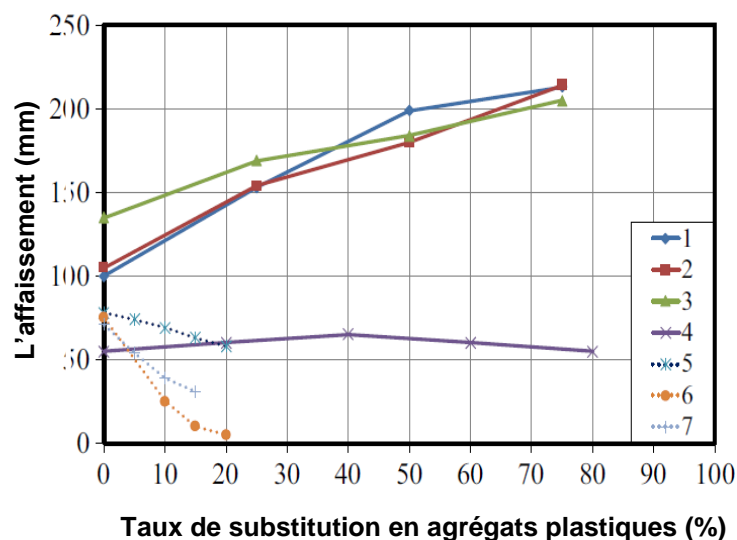
Les propriétés physico-thermiques			
La maniabilité	La densité	Les propriétés thermiques	
[14, 15, 54, 55, 56]	[14, 15, 21, 37, 62]	[21, 49, 56, 63].	
Caractéristiques Mécaniques			
La résistance à la compression	La résistance à la flexion	La vitesse de propagation des ondes sonores (UPV)	Le module d'élasticité
[14, 55, 56, 62,64]	[37, 54, 55, 60]	[17, 23, 51]	[15, 54, 55, 63].
L'exposition à hautes températures (résistance au feu)			
[65 -68].			
La microscopie électronique à balayage (MEB)			
[14, 37, 44, 63, 64].			
La durabilité			
La porosité	L'absorption	La pénétration des ions chlorures	
[37, 55, 56, 63, 69].	[37, 52, 69].	[14, 15].	



### I.9.1. Maniabilité (Affaissement)

La maniabilité désigne l'aptitude plus ou moins grande d'un béton ou d'un mortier en état frais, à remplir de façon homogène et sans défauts les vides des coffrages. Elle est en fonction d'une multitude de facteurs et donne lieu à des recettes spécifiques de formulations en fonction de l'ouvrage à construire avec l'emploi de granulats et d'adjuvants sévèrement dimensionnés et sélectionnés. Mais l'ajout d'autres mélanges, soit des minéraux ou des déchets affectent la maniabilité de béton.

La maniabilité du béton et de mortier contenant un agrégat de plastique a été étudiée de façon approfondie, quelques résultats trouvés dans diverses études sont représentés dans la figure I.11.



**Figure I.11 :** La variation de l'affaissement du béton avec le niveau de la substitution des agrégats plastiques [70]: (1), (2), (3): agrégats fins [71]; (4): agrégats grossiers [72]; (5): agrégats fins [64]; (6): agrégats fins [73]; et (7): agrégats fins [74].

L'examen de la littérature laisse apparaître des points de vue différents sur l'effet des déchets légers sur la maniabilité. Dans la majorité des études précédentes, L'ajout de déchets légers affecte la quantité d'eau disponible dans le béton et, par conséquent, l'ouvrabilité de béton. Une valeur inférieure d'affaissement du béton frais a été observée lorsque le taux de substitution en matière plastique est plus important. Les raisons pour lesquelles l'abaissement de l'affaissement du béton contenant des agrégats en plastique sont les bords aiguisés et la granulométrie des granulats angulaires en plastique.

D'autre part, dans quelques études une augmentation de la valeur de l'affaissement due à l'incorporation des granulats en plastique est également observée [54, 55]. L'augmentation de l'affaissement de béton en raison de l'incorporation des agrégats plastiques



est due à la présence d'une quantité importante de l'eau libre dans les mélanges contenant du plastique que dans le mélange de béton contenant des agrégats naturels, donc à la différence des granulats naturels, les agrégats en plastique ne peuvent pas absorber de l'eau lors du gâchage .

Batayneh et al. [64] ont rapporté que la matrice préparée par le remplacement de 20% d'agrégats fins par du plastique affecte la maniabilité jusqu'à 25%.

Ismail et Al-Hashmi [73] ont rapporté les effets de l'utilisation de déchets mixtes de fer et des plastiques dans le béton. Dans ce cas, des déchets plastiques granulaires ont été ajoutés dans le mélange de sable à 5% du poids. Le déchet en plastique granulaire utilisé dans le béton avait une large distribution, les dimensions avec des longueurs et des largeurs de 0,15 à 12 mm et de 0,15 à 4 mm, respectivement. L'ajout de 5% de déchets plastiques a diminué l'ouvrabilité de 25%, tandis que l'ajout de 30% de fer entraîne une augmentation de l'ouvrabilité de 50%.

Choi et al. [71] ont constaté que la valeur d'affaissement du béton augmente avec la croissance de la teneur de deux types d'agrégats de bouteilles traités de PET dans le béton. Selon ces auteurs, cette tendance est due à la forme sphérique de l'agrégat de PET ainsi que la texture de la surface glissante, ce qui diminue le contact interne entre la matrice et l'agrégat de PET et par conséquent augmente la valeur de l'affaissement.

Saikia et de Brito [56] ont trouvé deux types de comportement de la maniabilité dans les mélanges de béton contenant deux agrégats de forme différente de PET ; un agrégat de PET en forme granulé, sa surface de texture très lisse et deux fractions granulométriques différentes d'un agrégat de PET feuilletée ont été utilisés pour remplacer partiellement les classes grossières et fines des agrégats naturels. Tous les agrégats ont été obtenus à partir du même type de déchets plastiques du PET.

Rai et al. [74] ont signalé les effets de l'utilisation de déchets de plastique dans le béton. Dans cette étude, 5% à 15% des déchets de plastique ont remplacé le sable avec un module de finesse de 3.2. Les résultats ont indiqué que l'ouvrabilité a diminué jusqu'à 37% au fur et à mesure que la quantité des déchets augmente.

Senthil et al. [38] ont étudié les effets de l'ajout des déchets des pièces électroniques (E-plastique) sur la maniabilité du béton. Des E-plastiques ayant des proportions de 10, 20, 30, 40 et 50 % ont été utilisés. Ils ont montré que la maniabilité du béton a diminué jusqu'à un rapport d'aspect de 50% (Figure I.12).

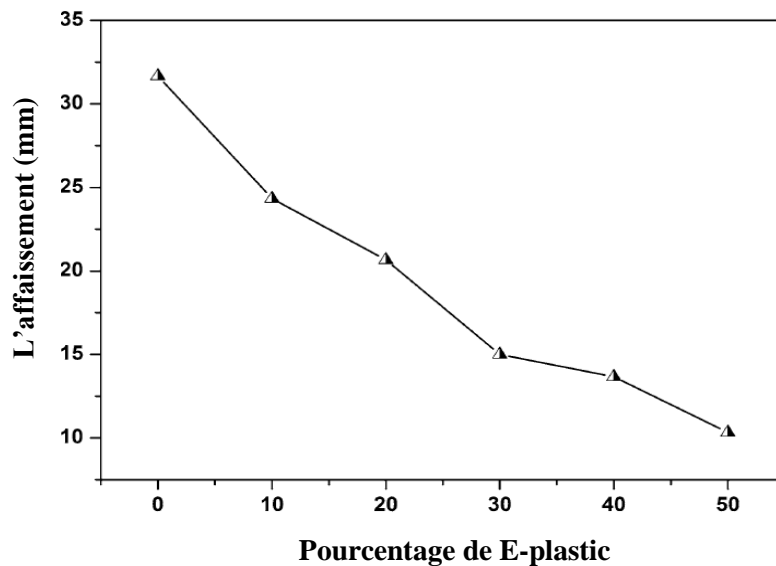


Figure I.12 : Etalement du béton en fonction du pourcentage de E-plastic [38].

### I.9.2. Densité

Le plastique a une densité inférieure à celle des agrégats naturels et on s'attend donc à ce que leur incorporation dans les mélanges cimentaires conduit à une diminution de cette propriété. Les résultats montrent que l'incorporation de matières plastiques comme agrégat diminue généralement la densité du béton/mortier résultant du fait de la légèreté de l'agrégat en plastique. Certains résultats sont présentés dans la figure I.13.

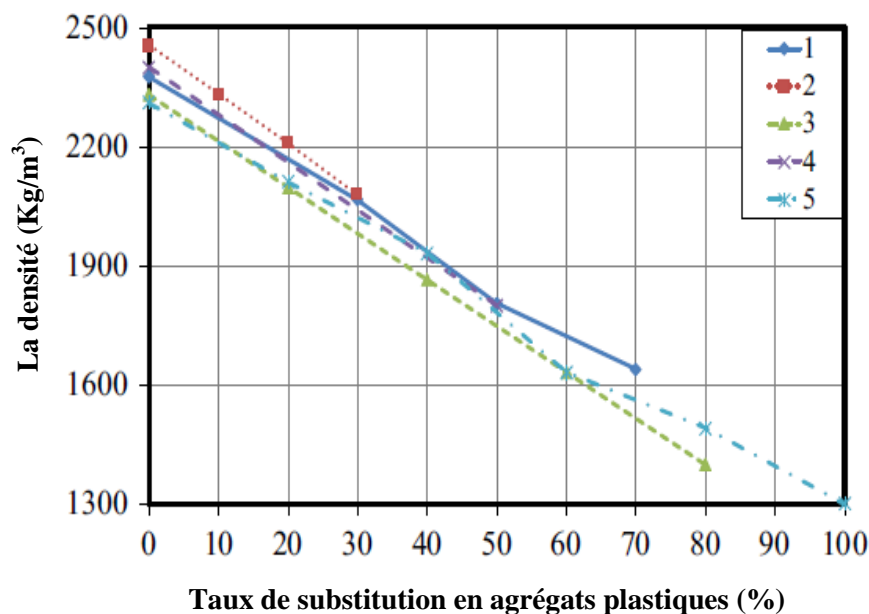


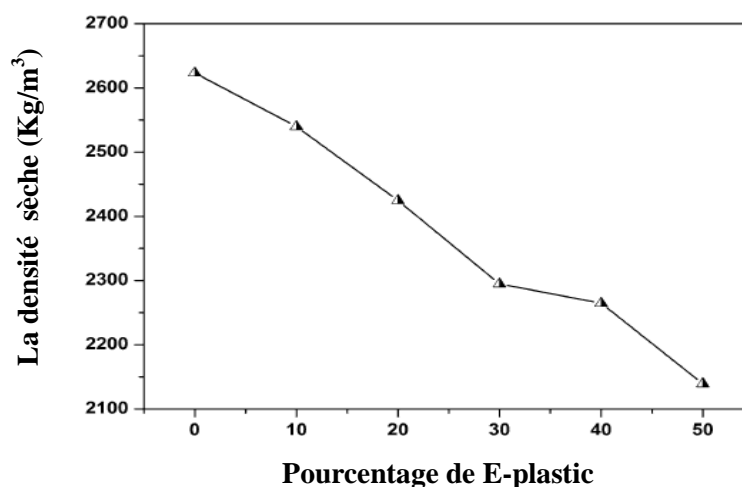
Figure I.13 : L'influence de l'incorporation des matières plastiques comme agrégat sur la densité du béton/mortier[70]: (1): [75]; (2): [76]; (3): [72]; (4): [77]; et (5): [78]

Corinaldesi et al. [79] ont observé une diminution considérable de la densité des mortiers durcis avec de la poussière de plastique renforcé PET (GFRP) et de fibres de verre comme des agrégats substituants le sable naturel. L'incorporation de 62% de GFRP a entraîné une diminution de densité d'environ 50% (de 2,06 à 1,05 g / cm<sup>3</sup>). Les mêmes résultats ont été montrés par Hannawi et al. [37] sur la variation des densités de béton contenant des déchets de PET et des déchets de polycarbonate (PC) comme agrégats à l'état frais et durcie. Leurs résultats montraient qu'il y avait une diminution dans les densités à l'état frais et durcie au fur et à mesure que le contenu en agrégats plastiques augmente. La densité à l'état durcie a diminuée, de 2173 kg/m<sup>3</sup> pour le béton ordinaire à 1755 et 1643 kg/m<sup>3</sup>, respectivement, pour les mélanges contenant 50% d'agrégats en plastique PET et PC. Ainsi, Saikia et de Brito [56] ont observé une réduction de la densité du béton frais dès que le volume d'agrégats en PET incorporés augmente.

Fraj et al. [63] ont observé une réduction significative de la densité à l'état frais et à l'état durci à 28 jours du béton contenant des agrégats de déchets de mousse polyuréthane par rapport au béton conventionnel.

Coppola et al. [80] ont produit des mortiers à base des agrégats légers de PP et de PE. Ils ont observé que l'incorporation de 25% d'agrégats plastiques légers en remplacement du sable a entraîné une diminution de la densité de près de 20% (de 2143 à 2212 kg / m<sup>3</sup> à 1756 à 1809 kg / m<sup>3</sup>).

Senthil et al. [38] ont étudié la densité du béton contenant des agrégats de déchets en pièces électroniques (E-plastique). Les résultats représentés sur la figure I.14 montrent que la densité du béton contenant l'agrégat E- plastique par substitution en volume de 10, 20, 30, 40 et 50 %<sup>v</sup> de granulats naturel tend à diminuer.



**Figure I.14 :** La densité du béton en fonction du pourcentage d'E- plastique à 28 jours [38].

Kismi et al. [42] ont travaillé sur l'incorporation des déchets de mousse de polyuréthane rigide (PUR) et des déchets de polystyrène expansé (PSE) comme granulats dans les mortiers, ils ont également constatés une diminution de la densité de 45% et 11% des mélanges de mortier contenant 50% des agrégats en PSE et PUR, respectivement.

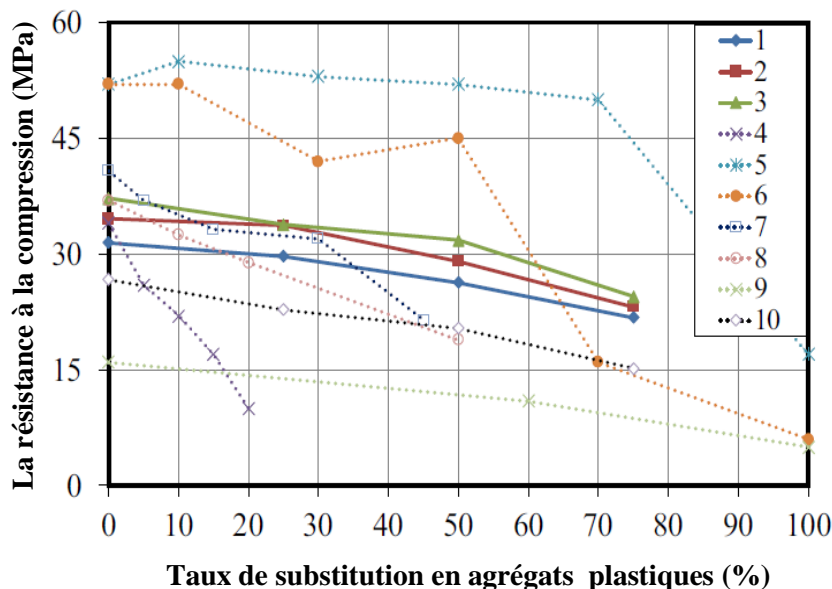
Guendouz et al. [81] ont étudié la possibilité d'utiliser des déchets des bouteilles plastiques en PET et des citernes (PEBD –polyéthylène à basse densité) dans le béton de sable sans aucune transformation sauf le broyage. Les résultats trouvés montrent que la substitution du sable par la poudre en plastique mène à des diminutions remarquables de la densité de tous les mélanges réalisés.

### I.9.3. Propriétés mécaniques

#### I.9.3.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton et du mortier est une propriété de base qui a été vue en détails dans presque tous les travaux de recherches concernant les agrégats en plastique. Il a été constaté que l'incorporation des agrégats plastique a diminuée la résistance à la compression du béton / mortier résultant.

La figure I.15 montre quelques résultats à 28 jours de la performance des résistances à la compression du béton/mortier contenant des déchets plastiques par la substitution partielle des agrégats naturels.



**Figure I.15:** La variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des agrégats plastiques à 28 jours [70] : (1), (2), (3): WPLA [75]; (4): Mélange de plastique [64]; (5), (6): PET [82]; (7): PVC [15]; (8): HIPS [83]; (9): PSE [23]; et (10): PET [84].

Kou et al. [15] ont signalé que la résistance à la compression du béton contenant des granulats de PVC en provenance des chutes des tuyaux en PVC a diminué avec l'augmentation de la teneur en PVC. Une étude de l'influence des granulats de PVC et des déchets de verre sur le comportement des bétons a été menée par Patel et al. [84]. Il a été constaté que la résistance à la compression des bétons contenant des granulats de PVC et les déchets de verre a diminué avec l'augmentation de la teneur de ces déchets.

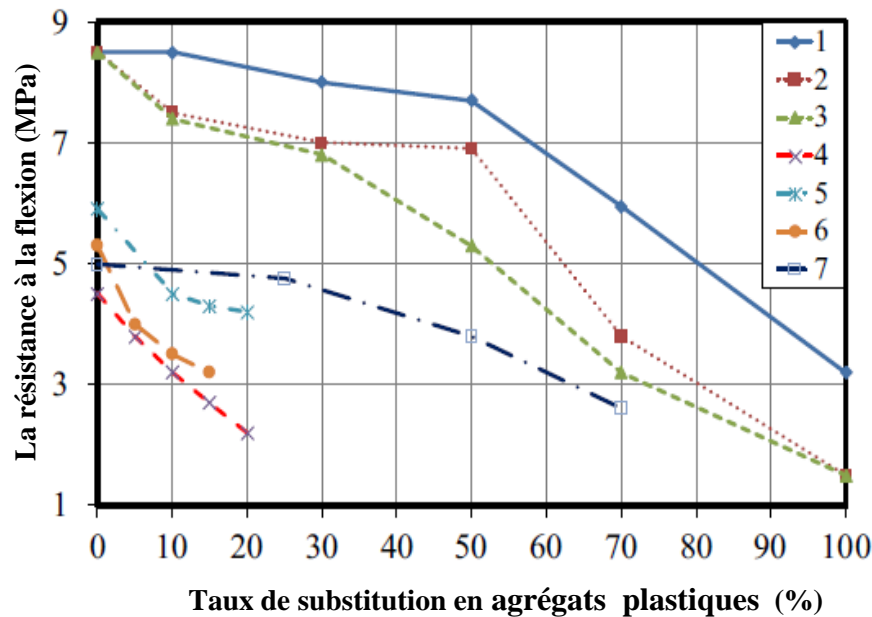
Frigione [61] a signalé que la résistance à la compression du béton préparé par la substitution de 5% en poids de granulats fin naturel par les agrégats des déchets de PET (PETW) est légèrement inférieure que celui du béton contenant des granulats naturels. Dans une autre étude, Hannawi et al. [37] ont rapporté que les résistances à la compression à 28 jours de mortier contenant des agrégats en PET et le polycarbonate (PC) préparés par le remplacement de 3%, 10%, 20% et 50% de sable, ont diminué lorsque la teneur des agrégats en plastique dans le mortier augmentent. Pour le même taux de substitution, la réduction de la résistance à la compression du mortier contenant un agrégat de PET est plus importante par rapport à celle du mortier contenant un agrégat PC. Des résultats similaires [38] ont confirmé que l'incorporation des agrégats plastiques (E-plastique) a diminué la résistance à la compression. Une perte d'environ 47,41% est enregistrée pour la résistance à la compression à un taux de remplacement de 50%.

Usahanunth et al. [59] ont signalé que la résistance à la compression des mortiers contenant des granulats de déchets de bakélite (WBFA : 20%, 40%, 60%, 80% et 100%) a diminué avec l'augmentation de la teneur de ce dernier.

Fraj et al. [63] ont détecté une diminution de 57% à 78% des résistances à la compression à 28 jours du béton contenant comme agrégats la mousse de polyuréthane (PUR) de la classe de 8-20 mm, par rapport au béton témoin. Cela est dû à la nature du béton léger, ainsi que pour les faibles propriétés mécaniques et la grande porosité de la mousse PUR. D'autres travaux de Mounanga et al. [21], ont signalé que le béton contenant des granulats de la mousse PUR et celui de l'agrégat naturel normal améliorent légèrement la résistance à la compression par rapport à la valeur correspondante à l'état durci et après séchage.

### **I.9.3.2. Résistance à la flexion**

De manière similaire au comportement de la résistance à la compression, les résultats présentés sur la figure I.16, montre que l'incorporation de tel type d'agrégat plastique abaisse la résistance à la traction par flexion du béton/mortier.



**Figure I.16 :** La variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage des agrégats plastiques à 28 jours [70]: (1), (2), (3): PET [82] ; (4): plastique mixte [64]; (5): plastique mixte (80% PET) [60]; (6): plastique mixte [74] ; et (7): PET [84].

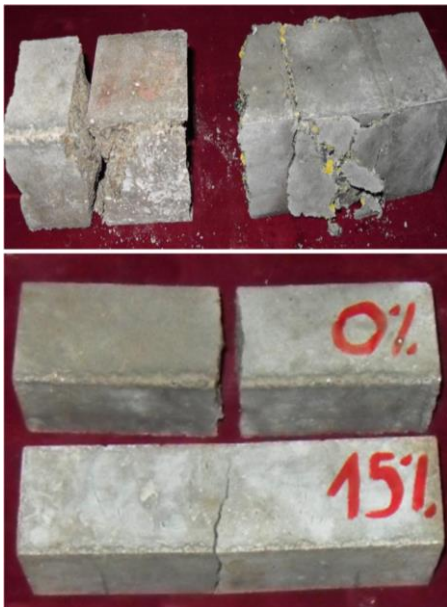
Kou et al. [15] et Harshad et al. [85], ont signalé que la résistance à la traction par flexion a diminué avec l'augmentation de la teneur en PVC d'une manière similaire à celle observé pour la résistance à la compression. Selon eux, la résistance à la traction par flexion du béton est influencée par les propriétés de la zone de transition interfaciale (ITZ). Selon Albano et al. [55] la diminution de la résistance à la traction par flexion est due à la porosité accrue dans le béton causée par l'incorporation des granulats de PET.

Kan et Demirbog [86] ont montré également des chutes de la résistance à la flexion du béton contenant du polystyrène expansé modifié thermiquement (PSEM). Batayneh et al. [64] ont indiqué que la tendance de décroissement de la résistance à la traction par flexion n'était pas aussi important que celle de la résistance à la compression.

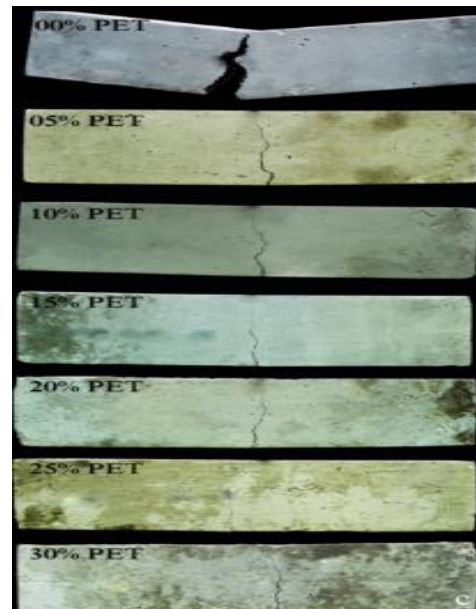
Hannawi et al. [37] ont déclaré une diminution de la résistance à la flexion des mortiers contenant des granulats de PET et de PC par rapport au mortier témoin. Une diminution de 9,5% et 17,9% pour les mortiers contenant 20% et 50% des granulats de PET, respectivement. Pour les mortiers contenant 50% des agrégats de PC, une baisse de 32,8% a été enregistrée. Les résultats présentés par Haghghatnejad et al. [87] ont montré des légères chutes de la résistance à la flexion du béton à base des agrégats de PVC par rapport au béton témoin.

### I.9.4. Caractéristiques des ruptures

Les échantillons contenant des agrégats plastiques peuvent supporter une charge pendant quelques minutes après la rupture. Au fur et à mesure que la teneur des agrégats plastiques augmente la rupture devient plus ductile, c'est ce qui a été observé par plusieurs chercheurs. Badache et al. [44] ont constaté que les mortiers composites montrent une bonne ductilité lorsque le taux de l'incorporation du sable en PEHD augmente. En d'autre terme, le mortier devient de plus en plus élastique et moins rigide (Figure I.17). Partant de l'observation du comportement de la rupture des mortiers après les essais des résistances à la flexion, Azhdarpour et al. [88] ont conclu que le mortier contenant des agrégats de PET est plus ductile. Cette ductilité permet d'augmenter la durée de la résistance de l'ouvrage avant de l'effondrement (Figure I.18).



**Figure I.17 :** Etat des éprouvettes des mortiers contenant des agrégats de PEHD après les essais de flexion et de compression [44].



**Figure I.18 :** Mode de défaillance des échantillons des mortiers contenant des agrégats de PET, après les essais de flexion [88].

Senhadji et al. [14] ont montré que la surface des granulats de PVC peut causer une faible adhésion entre les particules de PVC et de la pâte de ciment, la plupart des granulats de PVC dans la matrice de béton n'ont pas été rompus (restés intacts), mais elles ont décollé la pâte de ciment après avoir atteint la contrainte de rupture. Cette même constatation a été remarquée par Batayneh et al. [64], et Saikia et de Brito [56] pour d'autres déchets de plastique. Ces derniers auteurs ont constaté que les éprouvettes de béton contenant des particules de PET entraînaient un mécanisme de rupture plus lent au cours de l'essai de la résistance à la traction, car les agrégats de PET servaient comme des ponts entre les morceaux



séparés. D'autres auteurs, Frigione [61] et Hannawi et al. [37] ont observé que les échantillons contenant des agrégats plastiques n'ont pas présenté le même comportement à la rupture à un mortier conventionnel. À mesure que la teneur en agrégats de plastique augmente, la défaillance devient plus ductile. Les échantillons contenant des agrégats de plastique peuvent supporter la charge pendant quelques minutes après une défaillance mécanique, comme illustré à la figure I.19. Cette tendance semble être plus évidente à mesure que le pourcentage des agrégats de plastique augmente.



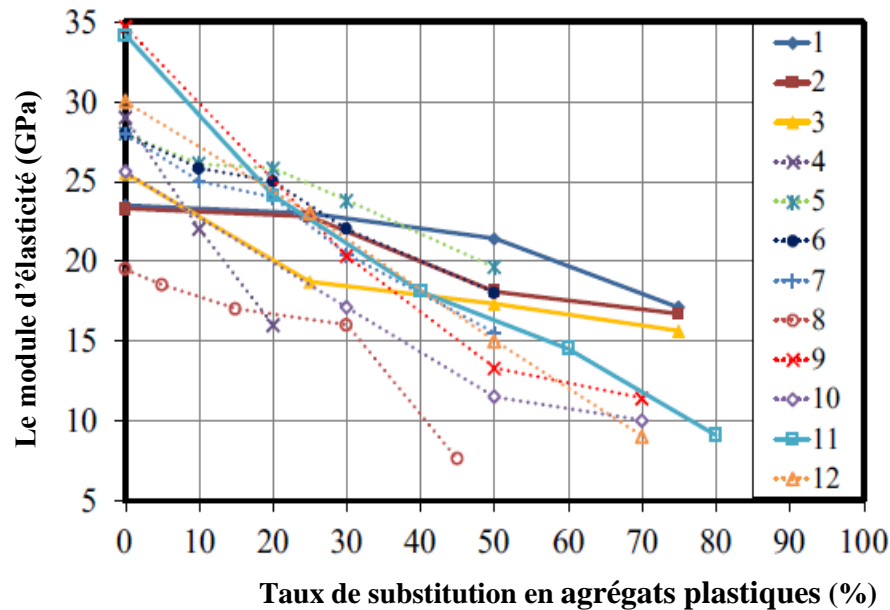
**Figure I.19 :** Type de rupture des éprouvettes cylindriques observée après les essais des résistances à la compression [37].

Fraj et al. [63] ont indiqué que le mécanisme de rupture du béton contenant des agrégats de la mousse PUR était différent de celui du béton témoin ; dans le cas du béton contenant des granulats de la mousse du polyuréthane, la rupture s'est produite sur l'interface matrice/agrégat de PUR (ITZ). La rupture est due principalement à des mauvaises caractéristiques de l'ITZ.

### I.9.5. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton/mortier dépend d'un grand nombre des paramètres tels que le E /C, le type de déchet plastique, la porosité des agrégats et les caractéristiques de la zone de transition interfaciale (ITZ). Les résultats du module d'élasticité des bétons et des mortiers contenant différents pourcentages des agrégats plastiques sont présentés par la figure I.20. D'après cette figure, on constate la diminution du module d'élasticité avec l'augmentation de la teneur globale en matière plastique; pour un même E/C.





**Figure I.20 :** La variation du module d'élasticité en fonction du pourcentage des agrégats plastiques à 28 jours [70]: (1), (2), (3): WPLA [54]; (4): PET [54]; (5), (6), (7): PET [82]; (8): PVC [15]; (9), (10): PSE [75]; (11): EPS [72]; et (12): PET [84].

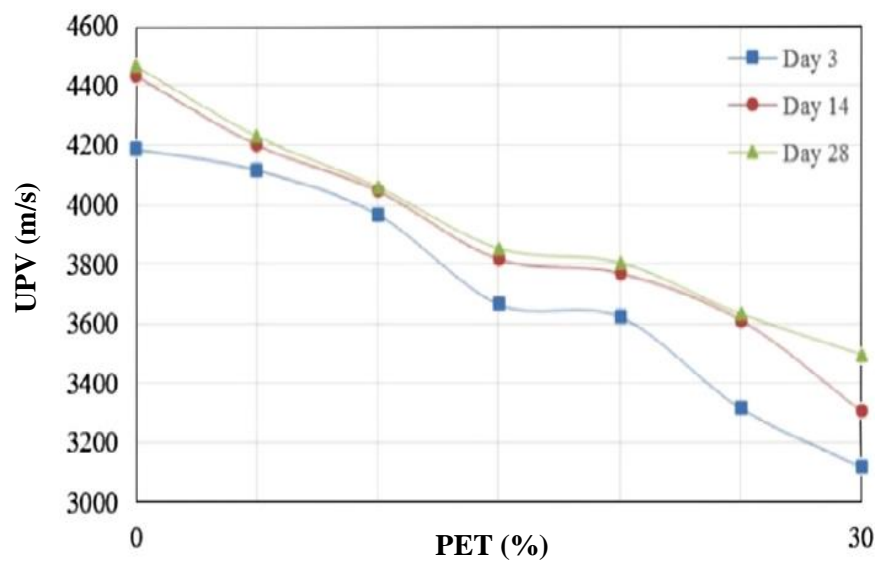
Choi et al. [54] ont étudié l'effet du PET sur le module d'élasticité du béton. Les mélanges de béton ont été confectionnés avec des taux de remplacement en volume de granulats fins par le PET de 0%, 25%, 50%, et 75%, et des rapports E/C de 45%, 49% et 53%. Ils ont constaté que le module d'élasticité des bétons a diminué avec l'augmentation des agrégats de PET. Dans une autre étude, Hannawi et al. [37] ont observé une diminution du module d'élasticité avec l'augmentation de la teneur en matière plastique. Rahmani et al. [17] ont conclu que la réduction du module d'élasticité du béton peut être due à la faible valeur du module d'élasticité des agrégats de PET. Cette réduction a une relation avec l'augmentation de la teneur de ces derniers. Saikia et al. [56] ont signalé que les agrégats de PET contenues dans le béton ont un module d'élasticité faible par rapport à l'agrégat naturel. Badache et al. [44] ont constaté une diminution du module d'élasticité dynamique ( $E_d$ ) des mortiers composites à base de PEHD par rapport au mortier témoin.

### I.9.6. Vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV)

Le test de la vitesse des impulsions ultrasoniques est effectué pour étudier l'homogénéité et la structure du béton/mortier. Actuellement, peu d'études sont disponibles pour évaluer l'UPV du béton contenant du plastique.

Les études précédentes montrent que le béton contenant du plastique a des valeurs d'UPV plus bas en raison du développement des pores. Rahmani et al. [17] ont observé la

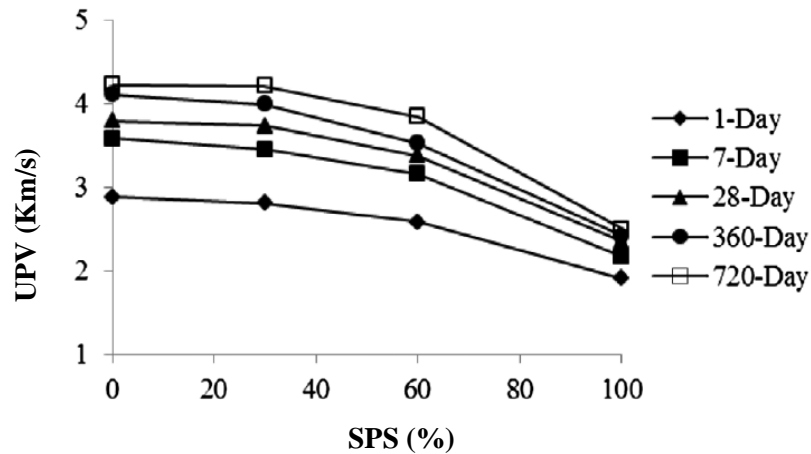
réduction de l'UPV en raison de l'augmentation de la teneur en agrégats de PET dans le béton. L'incorporation des agrégats de PET rend le béton poreux. Par conséquent, la plus basse vitesse d'impulsion ultrasonique a été enregistrée pour le béton contenant plus du PET. Le rapport E /C affecte également l'UPV. Plus le rapport E /C est élevé, l'excédent d'eau laisse des pores dans le béton, ce qui entraîne de la formation des vides pendant l'hydratation conduisant à une réduction de l'UPV. Selon Azhdarpour et al. [88], la diminution de de la vitesse des impulsions ultrasoniques est due à la porosité accrue dans le béton causée par l'incorporation des granulats de PET ainsi que par l'augmentation du rapport E/C (Figure I.21).



**Figure I.21:** Les valeurs de l'UPV du béton contenant différents taux de PET à différents âges [88].

Benosman et al. [89] ont présenté des résultats portant sur les essais non destructifs (NDT) tels que l'essai d'ultrason (UPV) et les propriétés thermiques des composites qui contiennent du PET broyé comme substituant au ciment avec quatre pourcentages (0%, 2.5%, 5.0% et 7.5%<sup>m</sup>). Ils ont constaté des baisses pour les valeurs de l'UPV des mortiers composites par rapport au mortier témoin. De même, Gouasmi et al. [90] ont dû constater la même observation pour les mortiers composites à base d'agrégats légers WPLA.

Herki et al. [23] ont enregistré une réduction de l'UPV du béton contenant des agrégats des mousses de polystyrène expansé (SPS) à celle du béton conventionnel. Les valeurs de l'UPV à 28 jours des bétons contenant 100% de SPS ont diminué de 38% par rapport au béton témoin (Figure I.22).

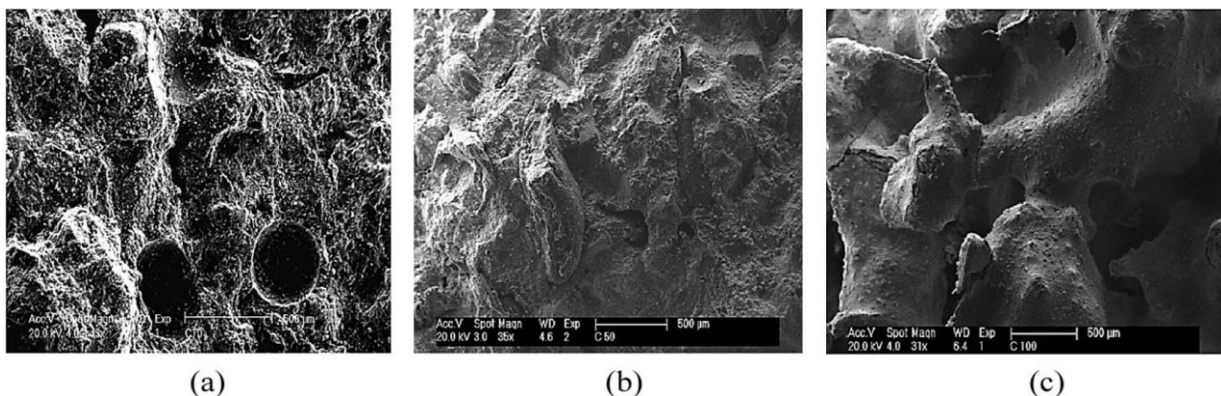


**Figure I.22 :** Les valeurs de l'UPV du béton contenant différents taux de SPS à différents âges [27].

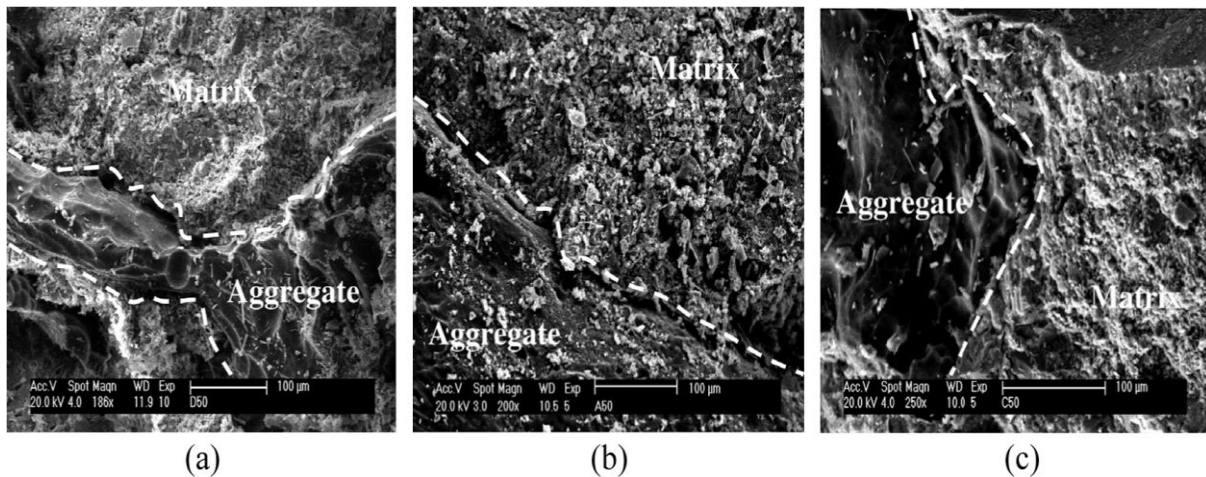
### I.9.7. La microstructure

La microstructure et la morphologie des composites mortier/béton à base des agrégats plastiques légers sont affectées par de nombreux paramètres tels que le type de plastique, leur taille et leur forme. L'étude du changement engendré par la substitution des agrégats naturel par des agrégats en plastique a été menée par plusieurs chercheurs.

La figure I.23 montre les images au MEB obtenus par Marzouk et al. [82] de béton avec un niveau de substitution de 30%, 50% et 100% de sable par des agrégats en PET ( $\leq 2$  mm). Les images révèlent une forte compacité dans les composites lorsque le volume substitué est inférieur ou égal à 50%. D'autre part, la structure apparaisse plus poreuse lorsque le volume substitué dépasse les 50%. D'un autre côté, Marzouk et al. [82] ont également fourni des images MEB de béton contenant du PET à trois tailles, de 1, 2 et 5 mm, avec un niveau de substitution de 50% (Figure I.24) (l'ITZ a été mise en évidence par une ligne discontinue). Ces images montrent une bonne adhérence matrice-agrégat et elle ne variait pas avec la taille des agrégats substitués.

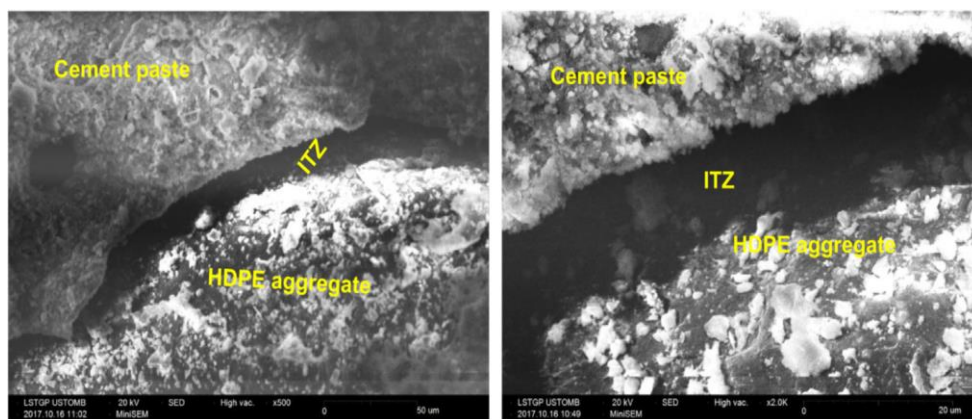


**Figure I.23 :** Images MEB des bétons contenant des agrégats PET ( $\leq 2$  mm) : (a) 30%, (b) 50%, (c) 100% [82].



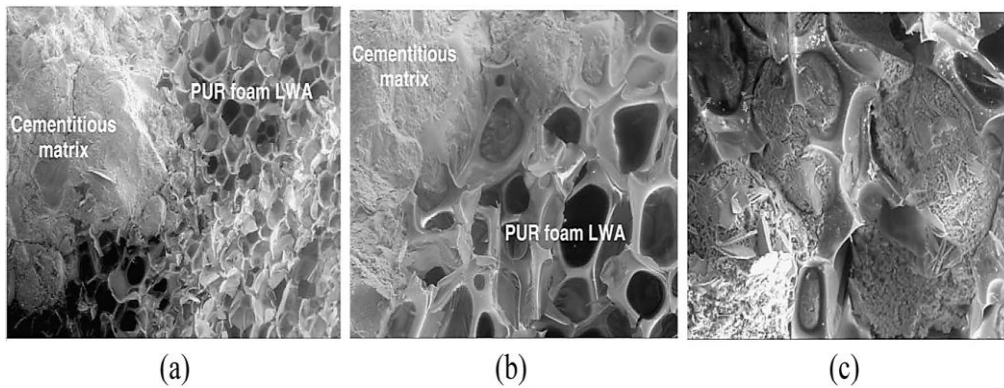
**Figure I.24 :** Images MEB des bétons contenant des agrégats PET à 50% : Types : A (5 mm), C (2 mm) et D (1 mm) ; (a) Type A, (b) Type C; et (c) Type D [82].

Badache et al. [44] ont présenté dans ces travaux des images MEB obtenues à l'âge de 28 jours sur la microstructure du mortier préparé par la substitution des agrégats naturels par des agrégats de PEHD (Figure I.25). Les images montrent une large ITZ entre les agrégats de PEHD et la matrice cimentaire. Cette forme d'ITZ présente une faible liaison, car elle agit comme une paroi entre la matrice et l'agrégat dans le mortier. Dans une autre étude, Fraj et al. [63], ont déduit à travers des images MEB, une bonne adhérence entre la matrice cimentaire et les agrégats de mousse de PUR dans la microstructure de béton contenant ces dernières agrégats (Figure I.26).



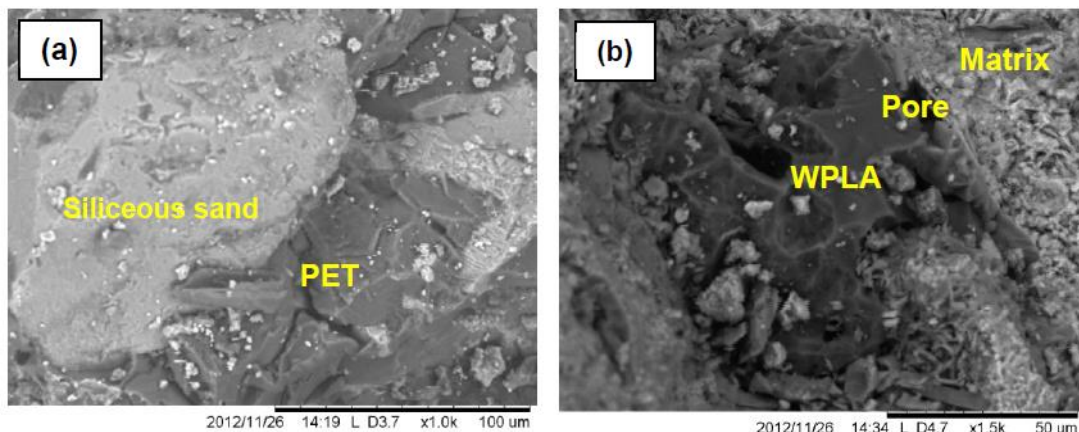
**Figure I.25 :** Zone ITZ entre la pâte de ciment et l'agrégat de PEHD dans un mortier contenant 60% de PEHD [44].





**Figure I.26 :** Zone ITZ entre la matrice cimentaire et la mousse de polyuréthane comme agrégats dans le béton à 28 jours. (a) ( $\times 100$ ); (b) ( $\times 300$ ); et (c) ( $\times 500$ ) [63].

Gouasmi et al. [91] ont montré sur des photos MEB illustré par la figure I.27, l'ITZ entre (sable siliceux-PET) et (pâte -WPLA) dans un mortier contenant des agrégats de WPLA. Ils ont conclu que le traitement thermique de l'agrégat composite WPLA produit une bonne adhésion entre les déchets plastiques PET et le sable siliceux d'une part, et d'autre part entre le composite WPLA lui-même et la matrice cimentaire (Figures I.27 a, b).



**Figure I.27:** Images MEB de la microstructure des échantillons : (a) WPLA; (b) WPLA100 [91].

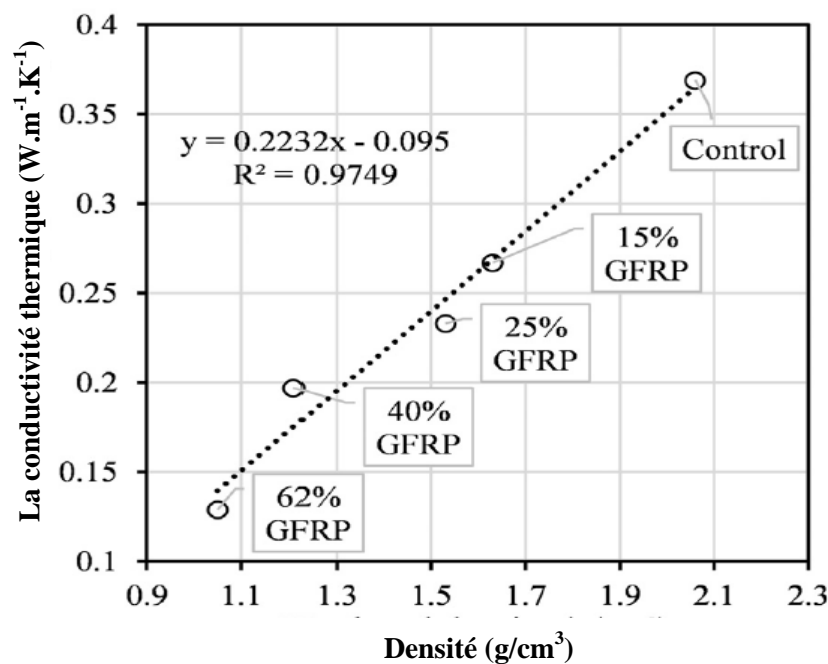
### I.9.8. Propriétés thermo-physiques

De nombreux auteurs ont constaté que l'introduction des agrégats légers dans un mortier/béton donne une amélioration des propriétés d'isolation thermique en raison de la faible conductivité thermique de ces agrégats. Dweik et al. [92] ont également observé une amélioration significative des propriétés d'isolation thermique des mortiers contenant des déchets de mélamine-formaldéhyde solides substituants le sable. Des similaires observations ont été aussi révélées par Mounanga et al. [21], ils ont observé une faible conductivité thermique du béton contenant des granulats de mousse du polyuréthane rigide (PUR)

substituant les agrégats fins naturels. Cette faible conductivité est due à la nature poreuse de l'agrégat de la mousse de polyuréthane. Ces pores contiennent de l'air, dont la conductivité thermique est beaucoup plus faible que celle des autres composants du béton.

Wang et al. [83] ont rapporté que la conductivité thermique du mortier contenant HIPS diminuait de 87%, 69% et 44% par rapport au mortier ordinaire lorsque le rapport HIPS était de 10%, 20% et 50%, respectivement. Cela a été attribué par la faible conductivité thermique du HIPS par rapport au sable naturel, et que le mortier fabriqué à l'aide du HIPS avait une densité plus faible. Benosman et al. [89] ont constaté des propriétés d'isolation thermique meilleures que ceux du mortier non modifié par le PET.

Corinaldesi et al. [79] ont également observé des baisses considérables de la conductivité thermique des mortiers à base de PET et de poussières de GFRP comme substituants au sable naturel par rapport au mortier témoin. Ils ont remarqué une forte corrélation entre la densité et la conductivité thermique (Figure I.28).



**Figure I.28 :** Corrélation entre la densité et la conductivité thermique des mortiers contenant des agrégats GFRP [79].

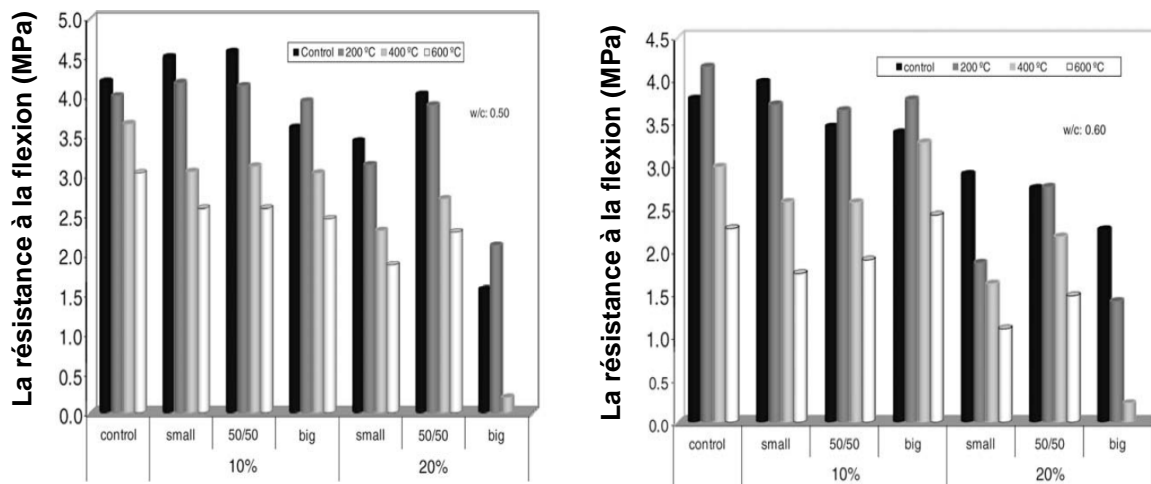
### I.9.9. Comportement à haute température (résistance au feu)

A hautes températures, la pâte de ciment subit des changements physiques et chimiques susceptibles d'affecter significativement les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons/mortiers [93]. Bien que le béton soit reconnu comme étant un excellent matériau thermorésistant parmi les divers matériaux de construction, le seul critique sur la détérioration

du béton ou mortier est observé quand il est exposé à des températures élevées comme le cas d'incendie par exemple. Nous citerons quelques constatations expérimentales sur le comportement du béton/mortier à base des agrégats légers à haute température.

L'action des hautes températures sur un élément structural en béton provoque une diminution graduelle des résistances à la compression et à la traction, qu'elles soient mesurées à chaud ou après refroidissement.

Albano et al. [55] ont étudié la résistance à la flexion du béton contenant du PET au moyen d'un essai de flexion trois points réalisé après l'exposition des échantillons dans un four à des températures de 200, 400 et 600 °C. Ils ont constaté qu'il n'y avait aucun changement notable à 200 °C. À 400 et 600 °C, le processus de dégradation du PET a été remplacé par la formation de produits gazeux qui ont provoqué la formation des pores dans les échantillons, diminuant ainsi la résistance à la flexion (Figure I.29).



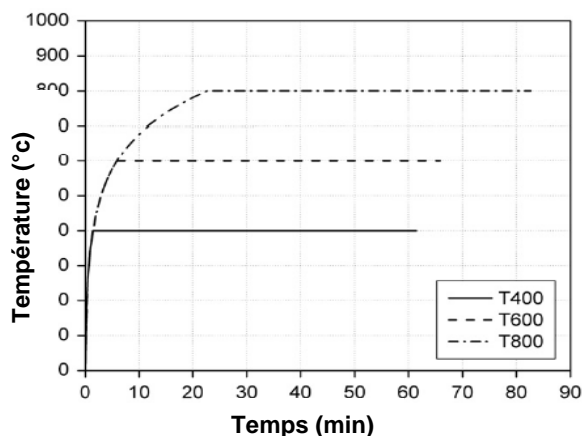
**Figure I.29** : La résistance à la flexion des bétons contenant des agrégats de PET substituants le sable naturel après l'exposition à hautes températures [55].

Awal et al. [65] ont étudié dans ses travaux l'effet de cendres d'huile de palmier sur le comportement du béton soumis à une température élevée. Des échantillons de béton ont été préparés là où le ciment Portland ordinaire a été remplacé par des cendres d'huile de palme à 50%, 60% et 70%. Les échantillons ont été traités thermiquement à des températures élevées de 200, 400, 600 et 800 °C dans un four électrique pendant 1 heure après avoir atteint la température maximale. Après avoir été exposés à ces températures, Les échantillons ont été durcis à l'air et ont été soumis à des tests d'observation visuelle, de modification du poids, de la vitesse des impulsions ultrasonores et de la résistance à la compression résiduelle. Il a été observé que plus la température s'élève, plus la perte de poids résiduel des échantillons de

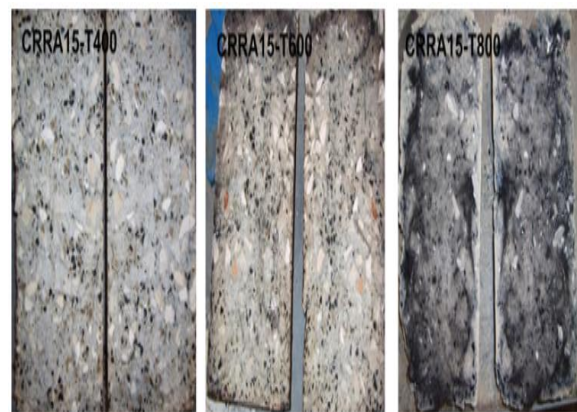


béton s'élève. Avec la perte de la résistance à la compression résiduelle, la vitesse des impulsions ultrasonores du béton a également été réduite à température élevée.

Marques et al. [67] ont étudié l'effet des agrégats de caoutchouc recyclés (RRA) sur le comportement mécanique du béton à haut température. Ils ont substitué le sable naturel avec des teneurs de 5, 10 et 15 % par des agrégats de caoutchouc. L'essai de chauffage a été conduit selon la norme ISO 834 [94] (Figure I.30), jusqu'aux températures de 400, 600 et 800 °C. Après avoir été exposés à ces températures, la résistance à la flexion et la résistance à la compression des éprouvettes ont été déterminés. Les résultats montrent des pertes considérables des propriétés mécaniques avec des dégradations avancées de béton contenant 15% des agrégats (RRA) à 800°C (Figure I.31).

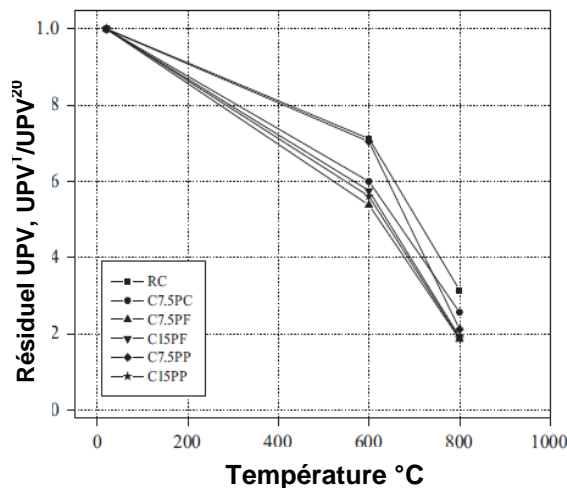


**Figure I.30 :** Courbes de traitement thermique à différentes températures d'exposition selon la norme ISO 834 [94].

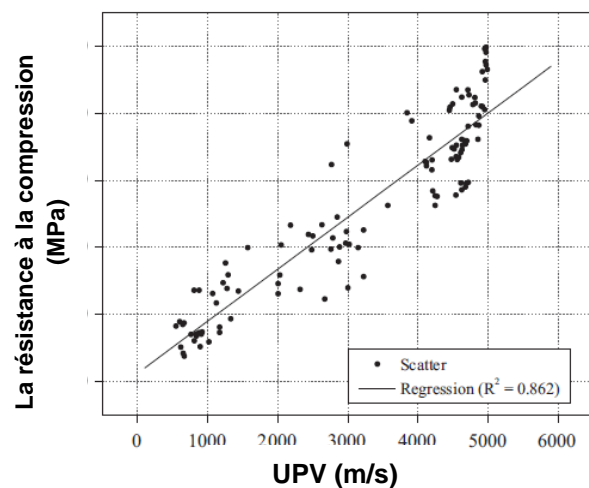


**Figure I.31 :** Eprouvette de béton contenant 15% d'agrégats de caoutchouc à différentes températures [67].

Correia et al [66] ont étudié dans ses travaux l'effet de trois types des déchets de PET sur le comportement physico-mécanique du béton soumis à des températures élevées. Ils ont substitué le sable naturel avec des teneurs de 7.5 et 15 % par des agrégats de PET. Les éprouvettes de bétons, issues de ces compositions, ont été soumises à des cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante à une température de 600 et 800°C. Les auteurs ont remarqué que les bétons substitués par le PET entraînent d'une façon générale des baisses de résistances mécaniques avec une diminution de l'UPV (Figure I.32). Ils ont également constaté une bonne corrélation entre la résistance à la compression et l'UPV des composites avec la température d'exposition (Figure I.33).

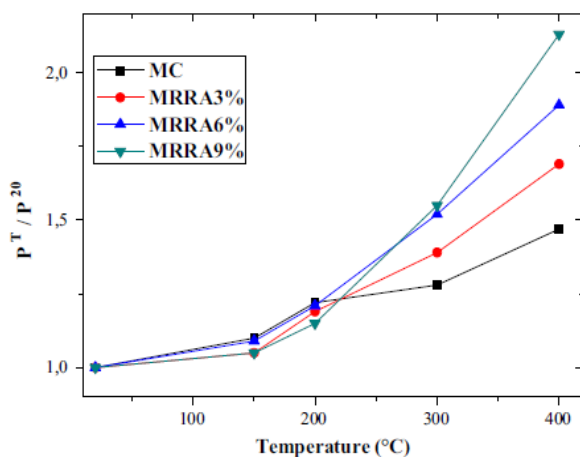


**Figure I.32** : L'UPV résiduels en fonction de la température d'exposition. [66].

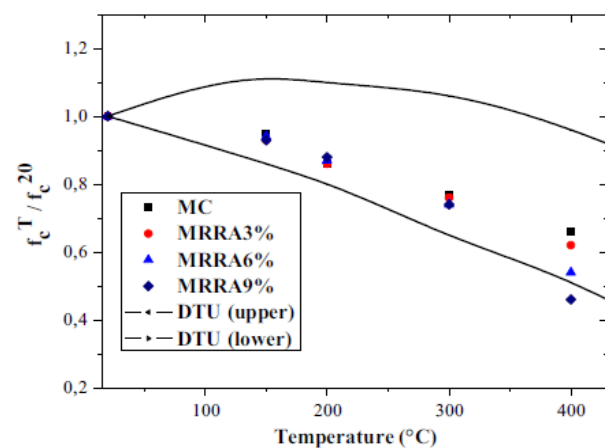


**Figure I.33** : Corrélation entre la résistance à la compression et l'UPV des composites après exposition à hautes températures [66].

Guelmine et al. [68] ont étudié l'effet des températures élevées sur les propriétés physico-mécaniques du mortier à base des agrégats en caoutchouc à haute température. Ils ont préparé un mortier témoin (MC) à base de sable naturel de dunes et trois autres mélanges obtenus par le remplacement partiel avec un taux de 3, 6 et 9% du sable avec la même masse de caoutchouc (RRA). Les échantillons ont été chauffés à des températures élevées de 150, 200, 300, et 400°C. Après avoir été exposés à ces températures, la porosité et les propriétés mécaniques ont été déterminés. Les résultats de cette étude ont montré une augmentation de la porosité avec la diminution des résistances mécaniques des mortiers contenant un taux de caoutchouc (RRA) supérieur à 3% (Figures I.34, 35).



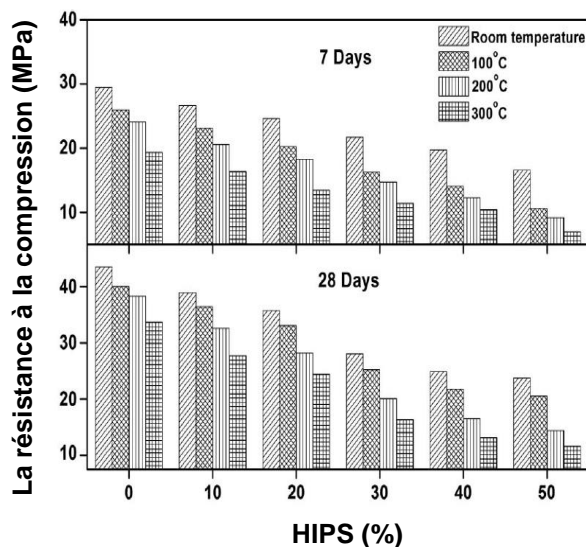
**Figure I.34** : L'effet des températures élevées sur la porosité ouvert des mortiers contenant des agrégats de caoutchouc (RRA) [68].



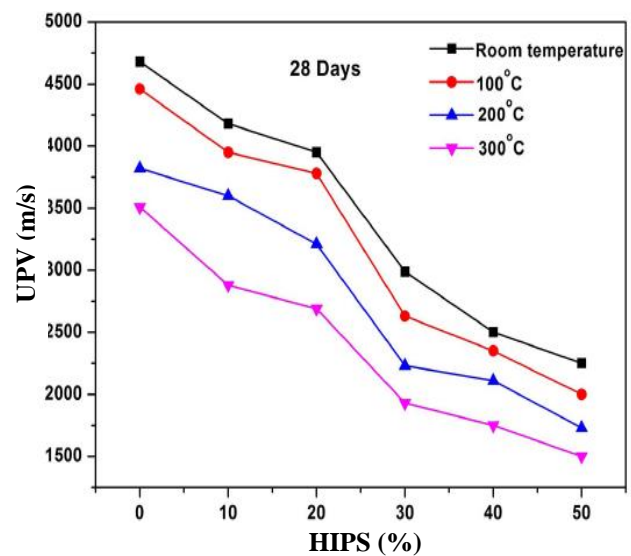
**Figure I.35** : L'effet des températures élevées sur la résistance à la compression des mortiers contenant des agrégats de caoutchouc (RRA) [68].

Coppola et al. [80] ont réalisé des mortiers à base des agrégats de PP (polypropylène) et de PE (polyéthylène) substituant le sable naturel et ont fait des analyses thermogravimétriques sur des prises d'échantillons. Les résultats ont montré une dégradation thermique significative dans les mélanges contenant des agrégats légers à des températures comprises entre 25°C et 900°C. L'utilisation des agrégats légers à 25% a entraîné une perte de masse de 18%, tandis que les échantillons témoins étaient un peu inférieurs à 8%.

Senthil et al. [95] ont présenté une étude expérimentale de l'effet de la température et du choc thermique sur les propriétés physico-mécaniques du béton confectionné avec le remplacement partiel des agrégats grossiers naturels en volume par des différents pourcentages (0, 10, 20, 30, 40 et 50%) de déchet des pièces électroniques « E-plastique » (polystyrène à haut impact HIPS). Les éprouvettes cubiques de béton avec des agrégats HIPS ont été chauffées à 100, 200 et 300 °C pendant 1 h à l'aide d'un four à moufle. Les résultats trouvés montrent une diminution de la résistance à la compression des éprouvettes avec l'augmentation de la teneur en HIPS à la température ambiante. De même, la résistance à la compression des éprouvettes a diminué avec l'augmentation du taux de HIPS sous l'exposition à des températures élevées (Figure I.36). Les valeurs de l'UPV ont diminué avec l'augmentation de la température; toutes les valeurs étaient inférieures au béton témoin (Figure I.37).



**Figure I.36 :** La résistance à la compression des bétons contenant des agrégats HIPS à différentes températures [95].



**Figure I.37 :** L'effet des températures élevées sur l'UPV des bétons contenant des agrégats HIPS [95].

### **I.9.10. Performances de la durabilité**

Plusieurs recherches ont été menées sur l'évaluation des facteurs de la durabilité pour le béton /mortier contenant des agrégats plastiques. Il s'agit notamment de la porosité, l'absorption d'eau et la pénétration des ions chlorures.

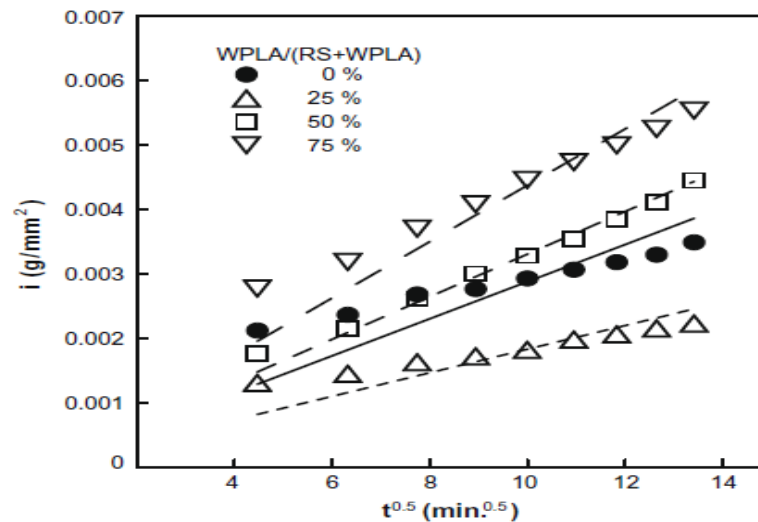
En général, la perméabilité des espèces chimiques agressives à travers les pores du béton/mortier est le principal facteur qui contrôle plusieurs propriétés de durabilité. Les essais tels que la mesure d'absorption d'eau, et la diffusion des ions chlorures peut fournir des informations sur la capacité du béton à empêcher la pénétration des espèces chimiques nuisibles.

#### **I.9.10.1. Porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire**

Chidiac et Mihaljevic [96] ont évalué le comportement de béton préparé avec la substitution des agrégats naturels par des agrégats de LDPE (polyéthylène à faible densité) et des agrégats de PEHD (polyéthylène à haute densité). Ils ont observé que les échantillons contenant des agrégats légers présentent une absorption d'eau plus élevée que le béton témoin. Dans le même contexte, Albano et al. [55] ont signalé que l'absorption d'eau est plus élevée pour les bétons contenant des granulats de PET par rapport aux bétons contenant uniquement des granulats naturels. Selon ces auteurs, la différence de la distribution granulométrique ainsi que la forme des granulats de plastique, en comparaison avec l'agrégat fin naturel, étaient responsables sur ce comportement.

Marzouk et al. [82] ont constaté des diminutions de la sorptivité pour les mortiers contenant du PET comme agrégat par rapport aux mortiers ne contenant pas de déchets de plastique. Ainsi, leurs résultats suggèrent une meilleure performance de la durabilité pour les mortiers contenant des agrégats de PET que pour les mortiers contenant des agrégats naturels lorsque ceux-ci entrent en contact avec des solutions agressives.

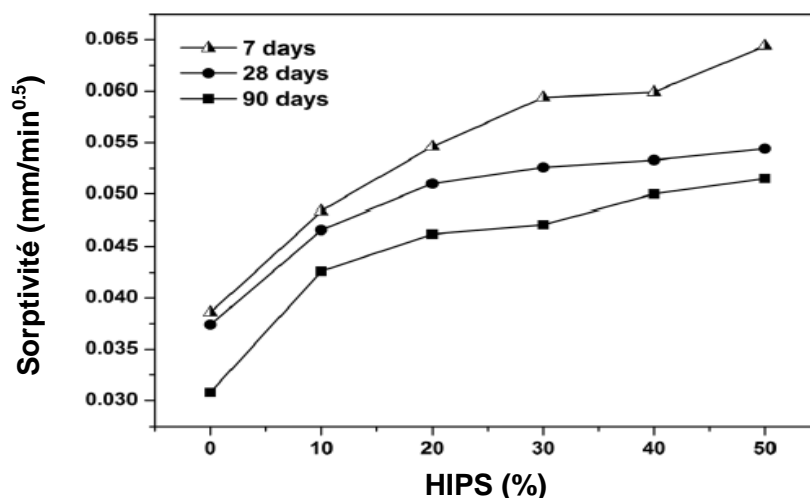
Choi et al. [54] ont mesuré le coefficient de sorptivité des mortiers durcis après 28 jours, qu'ils ont préparés en remplaçant 0, 25, 50 et 75% des granulats naturels par le WPLA (PET enrobé par le sable). Leurs résultats ont indiqué que la sorptivité des mortiers contenant un agrégat de WPLA à 25% de substitution était inférieur à celui du mortier témoin, tandis que pour 50% et 75% de substitution, elle était plus élevée (Figure I.28). De même, Hannawi et al. [37], Akcaozoglu et al. [97] et Saikia et al. [56] ont trouvé que l'absorption d'eau et la porosité était plus élevées pour un mortier contenant un agrégat de PET en comparaison avec un mortier témoin.



**Figure I.38 :** Coefficients de sorptivité du mortier à différents volumes de granulats WPLA [54].

Fraj et al. [63] ont enregistré une valeur plus élevée de la porosité accessible à l'eau du mortier contenant un agrégat des mousses de polyuréthane (PUR) à celle de mortier témoin. Les auteurs ont également rapportés que le pré-mouillage des granulats de mousse de polyuréthane (PUR) a augmenté la porosité.

Un programme expérimental a été réalisé par Senthil et al. [69] pour étudier les propriétés de transfert du béton préparé avec des déchets des pièces électroniques E- plastique (polystyrène à fort impact HIPS). Le béton a été préparé avec différents pourcentages (0, 10, 20, 30, 40 et 50%) de HIPS en remplacement partiel des agrégats grossiers naturels en volume. Leurs résultats ont révélé que les valeurs de la sorptivité ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en HIPS; toutes les valeurs étaient supérieures au béton témoin. Cependant, elles ont diminué avec l'augmentation de l'âge (Figure I.39).



**Figure I.39 :** Coefficients de la sorptivité du béton à différents volumes de granulats HIPS [69].

De même, Corinaldesi et al. [79] ont également observé une augmentation significative de l'absorption d'eau par capillarité dans des mortiers à base de PET et de poussière de GFRP en tant que sable. Ils ont constaté que l'incorporation de 62% de GFRP a entraîné une augmentation de l'absorption d'eau d'environ 80%.

Contrairement aux résultats précédents, Tittarelli et Shah [98] ont observé que le l'incorporation de 5% et 10% de poussière de GFRP a diminué l'absorption capillaire d'eau (respectivement, d'environ 60% et 40%) en dépit de la porosité totale plus élevée des mortiers.

### **I.9.10.2. Pénétration des ions chlorures**

L'attaque par les chlorures se distingue par le fait qu'elle entraîne la corrosion des armatures et qu'ensuite, comme conséquence de ce phénomène, le béton armé est dégradé. La résistance à la pénétration d'ions chlore dans le mortier et le béton est l'une des questions les plus importantes au sujet de la durabilité des structures en béton.

Kou et al. [15] ont étudiés la résistance à la pénétration d'ions chlores à 28 et 91 jours de béton durci préparé par la substitution partielle des agrégats naturels par des granulats de déchets de PVC. Les résultats observés ont indiqué que la résistance à la pénétration des ions chlorures du béton augmente avec l'augmentation de la teneur en PVC. Senhadji et al. [14] ont constaté que la substitution partielle (30, 50 & 70%<sup>v</sup>) de l'agrégat naturel (sable fin et agrégats 3/8) par des granulats de PVC, augmente la résistance à la pénétration des ions chlore. Les résultats montrent qu'il y'a un optimum de la résistance à la pénétration aux ions chlore à 30% de substitution.

Fraj et al. [63] ont évalué les coefficients de la diffusion des ions chlorures des bétons contenant de la mousse rigide de polyuréthane (PUR) substituant l'agrégat naturel grossier. Ils ont observé une plus faible valeur du coefficient de la diffusion d'ions chlore de béton contenant la mousse rigide PUR par rapport au béton contenant des granulats naturels. Ils ont également signalé que la réduction du rapport E/C et l'augmentation de la teneur en ciment pourraient améliorer considérablement la performance de la résistance aux chlorures du béton contenant de la mousse de polyuréthane rigide (PUR).

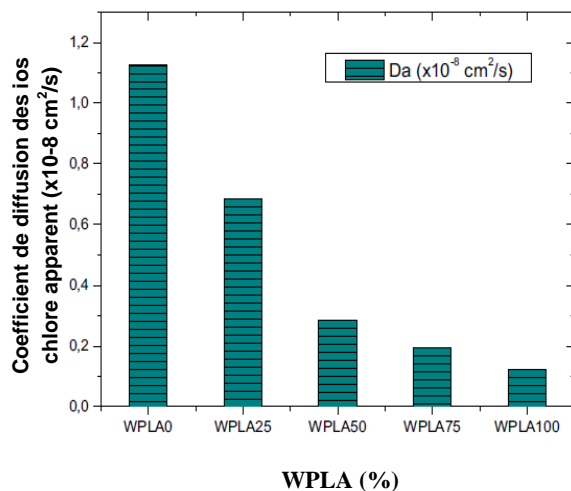
Benosman et al. [99] ont constaté que la substitution du ciment par des particules de déchets en PET diminuait la pénétration d'ions chlore en utilisant l'essai de la pénétration rapide d'ions chlores ( Rapid Chloride Penetration Test) (RCPT). Omrane et al. [100] a fait le



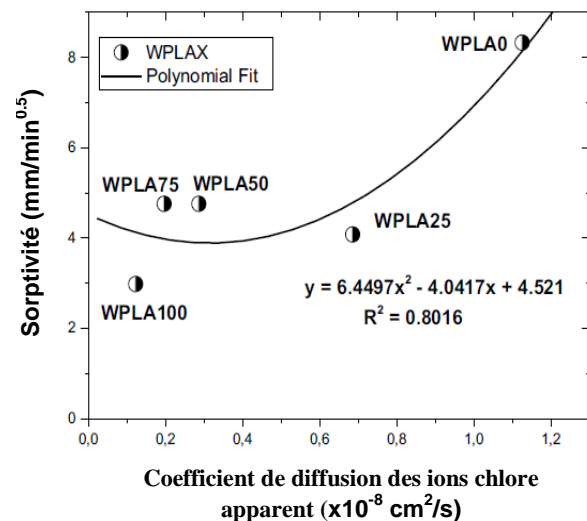
même constat, ils ont observé une profondeur de pénétration des ions chlorures nettement inférieure au mortier de référence.

Ghernouti et al. [101] ont remarqué que la substitution du sable concassé par les déchets des sacs plastiques (MPBW) (*Mortar Made with Plastics Bag Waste*) diminuait la profondeur de la pénétration des ions chlorures.

Gouasmi et al. [102] ont étudié la résistance des mortiers composites à base des agrégats légers en WPLA contre la pénétration d'ions chlore (NaCl 5%). Ils ont trouvé que la profondeur de la pénétration et le coefficient de diffusion apparent  $Da$  des ions chlorures des mortiers composites sont nettement inférieure que ceux du mortier non modifié. Ainsi, la perméabilité aux ions chlorures des mortiers contenant 100% de WPLA a été inférieure d'environ 90% à celle des mortiers témoins (Figure I.40, I.41).



**Figure I.40 :** Coefficients de la diffusion apparent des ions chlorures du béton à différents volumes des granulats WPLA [102].



**Figure I.41 :** Corrélation entre la sorptivité et le coefficient de la diffusion des ions chlorures des bétons contenant des agrégats WPLA [102].

Silva et al. [103] ont également indiqué que la profondeur de la pénétration au chlorure de béton contenant des déchets de PET était supérieure à celle du béton témoin. De plus, les échantillons de béton durcis au laboratoire présentaient une forte pénétration des ions chlorure par rapport aux échantillons durcis dans un environnement extérieur.



## I.10. Synthèse de la revue bibliographique

Cette revue bibliographique a été menée dans le but de faire l'état des connaissances des différentes recherches autour d'un matériau cimentaire à base des agrégats légers revalorisés.

La discussion de ce qui précède prouve que l'incorporation des déchets plastiques comme agrégats dans le béton/ mortier peut améliorer les différentes propriétés qui peuvent résoudre une partie du problème concernant l'élimination des déchets plastiques. Certaines de ces propriétés sont mises en évidence ci-dessous:

1. L'incorporation du plastique peut réduire la densité, les propriétés mécaniques, le module d'élasticité dynamique et l'UPV du béton/mortier résultant.

2. L'utilisation des déchets plastiques dans le béton/mortier peut améliorer son comportement de rupture et donc ce type de béton/mortier peut absorber de grandes quantités d'énergie, ce qui a plusieurs implications pratiques.

3. La microstructure de l'agencement ITZ au sein des matériaux composites à base des déchets plastiques reste faible par rapport aux matériaux cimentaires classiques.

4. L'agrégat des déchets plastiques a sensiblement une plus faible conductivité thermique que l'agrégat naturel utilisé dans la préparation des bétons/mortiers. Ainsi, l'ensemble des matériaux cimentaires contenant des agrégats en plastique auront des propriétés d'isolation thermique meilleure que ceux des matériaux classiques, et qui peuvent être utilisés pour contrôler la perte de chaleur des bâtiments pendant l'hiver et refléter la chaleur pendant l'été.

5. L'absorption d'eau et la porosité du béton/mortier contenant des agrégats des déchets plastiques augmentent, car les agrégats plastiques et naturels ne se mélangent pas suffisamment dans la matrice du béton/mortier, ce qui donne une matrice poreuse.

6. L'utilisation des déchets plastiques conduit à une moindre résistance au feu des matériaux cimentaires composites par rapport aux ceux classiques.

7. La pénétration des ions chlorures peut augmenter pour l'un (matériaux composites), et diminuer pour d'autres suivant la nature des déchets plastiques utilisés.

L'amélioration des propriétés due à l'addition des déchets plastiques peuvent avoir d'immenses conséquences pratiques sur l'environnement et l'économie ; et donc les futures études devraient être mis en œuvre pour obtenir des bétons/mortiers produits à base des déchets plastiques durables, de qualité, mais rentables aussi.

## I. 11. Problématique et axes de recherche

D'après notre synthèse bibliographique à l'échelle nationale et internationale qui concerne le ciment, les superplastifiants, et le comportement physico-mécanique, thermique, la résistance au feu et la résistance chimique vis-à-vis de la pénétration des ions chlorures des mortiers/bétons composites à base des déchets plastiques.

Le bilan de l'étude bibliographique précédente, fait apparaître des insuffisances notoires dans la connaissance des propriétés thermiques, la résistance au feu et la durabilité des composites à base des agrégats en déchets plastiques. Très peu de réponses sont apportées actuellement.

Afin de combler certaines lacunes dans l'étude bibliographique, nous allons tenter de caractériser tout d'abord, le comportement physico-mécanique, les masses volumiques à l'état frais et durci, le flow test (étalement), ainsi que les résistances mécaniques des mortiers LMEPVC à court et à long terme et la caractérisation thermo-physique avec et sans ajout de l'agrégat composite EPVC. Nous tenterons, aussi, d'expliquer les déformations structurelles à partir d'une analyse caractérisant la microstructure des composites LMEPVC par la spectrométrie IRTF, la diffraction aux rayons "X", le microscope optique et le MEB. La dernière partie de ce travail est consacrée à l'étude de la durabilité des mortiers LMEPVC en environnements agressifs riche en ions chlore.

Les processus opératoires sont décrit et caractériser préalablement pour tous les compositions.

Les principaux axes de l'étude des mortiers composites LMEPVC sont les suivants:

- Résorption d'une quantité maximum du déchet utilisé le polychlorure de vinyle expansé EPVC par l'étude du taux de substitution du sable naturel ;
- Caractérisation à l'état frais des mortiers légers conçus ;
- Etude des propriétés physico-mécaniques et thermiques des mortiers composites légers ;
- Etude du comportement sous hautes températures des mortiers légers LMEPVC ;
- Etude de la microstructure des composites LMEPVC par différentes méthodes d'analyses spectroscopiques. Observation de l'agencement ITZ : agrégats EPVC-matrice cimentaire ;
- Attaque chimique des mortiers composites légers LMEPVC par les ions chlorures.

### Références bibliographiques

- [1] Neville AM: Properties of concrete. *Trans-Atlantic Publications*. 2012, Inc.; 5<sup>e</sup> édition.
- [2] Folliot A, « Le ciment », dans Le béton hydraulique : connaissance et pratique. chap. 1, *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris, 1982.
- [3] Rixom M. R, Mailvaganam N. P: Chemical admixtures for concrete. *E & F. N. Spon,Ed.*, London, 1986.
- [4] Dodson V. H: Concrete admixtures, Van Nostrand Reinhold, *Structural Engineering Series, Ed*, New York, 1990.
- [5] Plastics Europe: Plastics-the Facts 2013. An Analysis of European Latest Plastics Production, *Demand and Waste Data*. 2013.
- [6] Zhou C, Fang W, Xu W, Cao A, Wang R: Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. *J. Clean. Prod.*2014, 80: 80-86.
- [7] Papong S, Malakul P, Trungkavashirakun R, Wenunun P, Chom-in T, Nithitanakul M: Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. *J. Clean. Prod* 2014, 65: 539-550.
- [8] Badia JD, Stromberg E, Karlssonb S, Ribes-Greus A: The role of rystalline, mobile amorphous and rigid amorphous fractions in the performance of recycled poly (ethylene terephthalate) (PET). *Polym. Degrad. Stab* 2012, 97: 98-107.
- [9] Association of Plastics Manufactures in Europe (APME), Plastic recovery in perspective: plastics consumption and recovery in Western Europe 2004. [www.plasticeurope.org](http://www.plasticeurope.org)
- [10] Subramanian MP: Plastics recycling and waste management in the US. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000, 28:253-263.
- [11] Aattache A, Mahi A, Soltani R, Mouli M, Benosman AS: Experimental study on thermomechanical properties of Polymer Modified Mortar. *Materials & Design* (1980-2015) 2013,52:459-469.
- [12] Ohama Y: Polymer-based Admixtures. *Cement and Concrete Composites*1998, 20: 189-212.
- [13] Benazzouk A, Douzane O, Mezreb K, Quéneudec M: Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste. *Cem. Concr. Comp*2006. 28 (7): 650–657.
- [14] Senhadji Y, Escadeillas G, Benosman A, Mouli M, Khelafi H, Ould Kaci S: Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2015, 29(7):625-640.
- [15] Kou S, Lee G, Poon C, Lai W: Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management* 2009, 29(2):621-628.
- [16] Benosman A, Taïbi H, Mouli M, Senhadji Y, Belbachir M, Bahlouli I, Houivet D: L'effet de l'ajout du PET sur les performances mécaniques des matériaux Composites Mortier-PET (Effect of addition of PET on the mechanical performance of PET-Mortar Composite materials). *J Mater Environ Sci* 2015:559-571.
- [17] Rahmani E, Dehestani M, Beygi M, Allahyari H, Nikbin I: On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials* 2013, 47:1302-1308.
- [18] Akçaözoğlu S, Ulu C: Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials* 2014, 58:31-37.
- [19] Foti D: Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures* 2013, 96:396-404.
- [20] Aattache A, Soltani R, Mahi A: Investigations for properties improvement of recycled PE polymer particles-reinforced mortars for repair practice. *Construction and Building Materials* 2017,146:603–614.
- [21] Mounanga P, Gbongbon W, Poullain P, Turcry P: Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement and Concrete Composites* 2008, 30(9):806-814.
- [22] Yacine A, Ratiba MK, Abderrahmane G: Ceramic waste influence on dune sand mortar performance, *Construction and Building Materials* 2016, 125:703–713.

- [23] Herki B, Khatib J, Negim E: Lightweight concrete made from waste polystyrene and fly ash. *World Applied Sciences Journal* 2013, 21(9):1356-1360.
- [24] Kaya A, Kar F: Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and Building Materials* 2016, 105:572–578.
- [25] Corinaldesi V, Mazzoli A, Siddique R: Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste, *Construction and Building Materials* 2016, 123:281–289.
- [26] Chidiac SE, Mihaljevic SN: Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. *Cement & Concrete Composites* 2011,33: 855–863.
- [27] Corinaldesi V, Gnappi G, Moriconi G, Montenero A, Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management* 2005, 25:197–201.
- [28] Matos AM, Nunes S, Sousa-Coutinho J: Cork waste in cement based materials. *Materials and Design* 2015,85:230–239.
- [29] Brás A, Fábio G, Faustino P, Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: thermal performance and cost evaluation. *Energy .Build* 2014, 72:296–308.
- [30] Li JJ, Wan CJ, Niu JG, Wu LF, Wu YC: Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 2017,131:449–458.
- [31] Aamr-Daya E, Langlet T, Benazzouk A, Quéneudec M: Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: Physico-mechanical properties. *Cement & Concrete Composites* 2008, 30:957–963.
- [32] Binici H, Aksogan O, Eco-friendly insulation material production with waste olive seeds,ground PVC and wood chips. *Journal of Building Engineering* 2016, 5:260–266.
- [33] Chabannes M, Bénétet J, Clerc L, Garcia-Diaz E: Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. *Construction and Building Materials* 2014,70:428–438.
- [34] Chakraborty S, Kundu SP, Roy A, Adhikari B, Majumder SB: Polymer modified jute fibre as reinforcing agent controlling the physical and mechanical characteristics of cement mortar. *Construction and Building Materials* 2013, 49:214–222.
- [35] Boumhaout M, Boukhattem L, Hamdi H, Benhamou B, AitNouh F: Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. *Construction and Building Materials* 2017.135: 241–250.
- [36] Raut AN, Gomez CP: Thermal and mechanical performance of oil palm fiber reinforced mortar utilizing palm oil fly ash as a complementary binder. *Construction and Building Materials* 2016, 126:476-483.
- [37] Hannawi K, Kamali-Bernard S, Prince W: Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste management* 2010, 30(11):2312-2320.
- [38] Senthil Kumar K, Baskar K: Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries. *J Mater Cycles Waste Manag* 2015, 17:718 –724.
- [39] Corinaldesi V, Mazzoli A, Moriconi G: Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials and Design* 2011, 32:1646–1650.
- [40] Haghghatnejad N, Yasin Mousavi S, Jalal Khaleghi S, TabarsaA, Yousefi S , Properties of recycled PVC aggregate concrete under different curing conditions. *Construction and Building Materials* 2016, 126: 943–950.
- [41] Ayadi A, Stiti N, Boumchedda K, Rennai H, Lerari Y: Elaboration and characterization of porous granules based on waste glass. *Powder Technology* 2011, 208:423–426.
- [42] Kismi M, Mounanga P : Comparaison performantielle à court et à long termes de Mortiers légers à base de déchets de mousse de polyuréthane rigide et de billes de polystyrène expansé, *INVACO* 2012.
- [43] Gregorova V, Ledererova M, Stefunkova Z: Investigation of Influence of Recycled Plastics from Cable, Ethylene Vinyl Acetate and Polystyrene Waste on Lightweight Concrete Properties. *Procedia Engineering* 2017, 195:127 – 133.
- [44] Badache A, Benosman AS, Senhadji Y, Mouli M: Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials* 2018, 163:40-52.

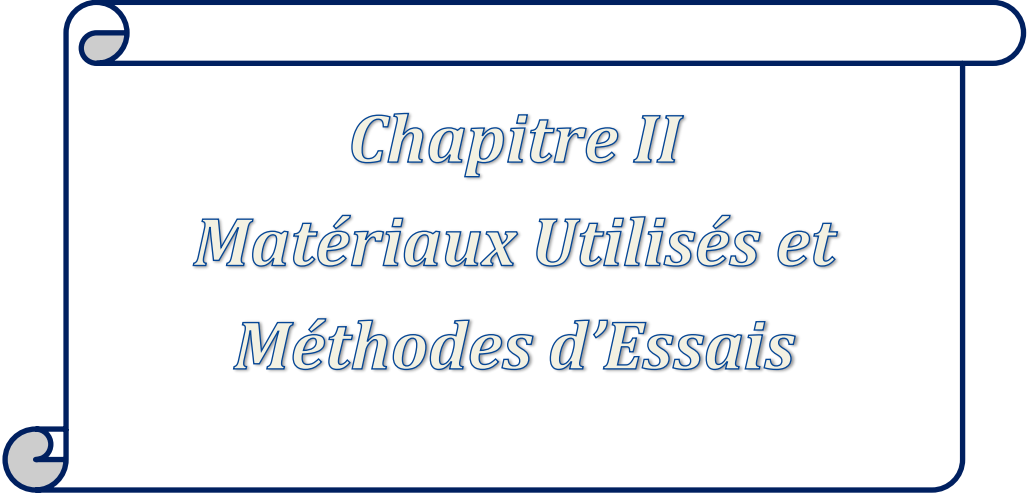
- [45] Vieira R, Soares R, Pinheiro S, Paiva O, Eleutério J, Vasconcelos R: Completely random experimental design with mixture and process variables for optimization of rubberized concrete. *Construction and Building Materials* 2010, 24:1754–1760.
- [46] Zheng L, Huo S, Yuan Y: Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials* 2008, 22:939–47.
- [47] Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials* 2011,25, 1906-1915.
- [48] Bhogayata A, Shah K, Vyas B, Arora N: Feasibility of waste metallised polythene used as concrete constituent. *Int J Eng Adv Technol* 2012, 1(5):204 -207.
- [49] Fraternali F, Ciancia V, Chechile R, Rizzano G, Feo L, Incarnato L: Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Composite Structures* 2011, 93(9):2368-2374.
- [50] Xuan W, Chen X, Yang G, Dai F, Chen Y: Impact behavior and microstructure of cement mortar incorporating waste carpet fibers after exposure to high temperatures, *Journal of Cleaner Production* 2018, 187:222-236.
- [51] Kim J-H J , Park C-G, Lee S-W, Lee S-W, J-P Won : Effects of the geometry of recycled PET fibre reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites: Part B* 2008,39:442– 450.
- [52] <http://www.vinylplus.eu/publications/70/59/Progress-Report-2013.Rapport> d'avancement VinylPlus 2013.
- [53] Fiche technique pour FOREX<sup>®</sup> classic. ALCAN COMPOSITES, Alcan Airex AG, Speciality Foams, CH-5643 Sins, Suisse. [www.displayeu@alcan.com](http://www.displayeu@alcan.com) .
- [54] Choi YW, Moon DJ, Kim YJ, Lachemi M: Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials* 2009, 23(8):2829-2835.
- [55] Albano C, Camacho N, Hernandez M, Matheus A, Gutierrez A: Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management* 2009, 29(10):2707-2716.
- [56] Saikia N, Brito Jd: Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Materials Research* 2013, 16(2):341-350.
- [57] Babu DS, Babu KG, Wee T: Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research* 2005, 35(6):1218-1223.
- [58] Kumar K, Prakash P: Use of waste plastic in cement concrete pavement. *Adv Mater Res J* 2006, 15:1-21.
- [59] Usahanunth N, TuprakayS: the transformation of waste Bakelite to replace natural fine aggregate in cement mortar. *Case Studies in Construction Materials* 2017, 6:120 –133.
- [60] Ismail ZZ, Al-Hashmi E: Validation of using mixed iron and plastic wastes in concrete. In: *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies Ancona*: 2010; 2010: 393-403.
- [61] Frigione M: Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste management* 2010, 30(6):1101-1106.
- [62] Ferreira L, de Brito J, Saikia N: Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials* 2012, 36:196-204.
- [63] Fraj AB, Kismi M, Mounanga P: Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 2010, 24(6):1069-1077.
- [64] Batayneh M, Marie I, Asi I: Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste management* 2007, 27(12):1870-1876.
- [65] Awal AA, Shehu I, Ismail M: Effect of cooling regime on the residual performance of high-volume palm oil fuel ash concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials* 2015, 98:875-883.
- [66] Correia J, Lima J, De Brito J: Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites* 2014, 53:187-199.
- [67] Marques AM, Correia JR, de Brito J: Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire SafetyJournal* 2013, 58: 49–57.



- [68] Guelmine L, Hadjab H, Benazzouk A: Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar. *Construction and Building Materials* 2016,126: 77–85.
- [69] Senthil Kumar K, Premalatha, P V, and Baskar K: Evaluation of Transport Properties of Concrete Made With E-Waste Plastic. *Journal of Testing and Evaluation* 2017, 45( 5) : 1849–1853,
- [70] Gu L, Ozbakkaloglu T: Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management* 2016, 51:19-42.
- [71] Choi Y-W, Moon D-J, Chung J-S, Cho S-K: Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and concrete research* 2005, 35(4):776-781.
- [72] Tang W, Lo Y, Nadeem A: Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites* 2008, 30(5):403-409.
- [73] Ismail ZZ, Al-Hashmi EA: Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste management* 2008, 28(11):2041-2047.
- [74] Rai B, Rushad ST, Kr B, Duggal S: Study of waste plastic mix concrete with plasticizer. *ISRN Civil Engineering* 2012, 2012.
- [75] Sabaa B, Ravindrarajah RS: Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste. In: *Proceedings of the Symposium MM: Advances in Materials for Cementitious Composites, Boston, MA, USA: 1997; 1997: 1-3.*
- [76] Ravindrarajah RS: Bearing strength of concrete containing polystyrene aggregate. In: *Proc the RILEM 8th Int Conf Durability of Building Materials and Components, Vancouver, Canada: 1999; 1999: 505-514.*
- [77] Lima PRL, Leite MB, Santiago EQR: Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. *Waste management* 2010, 30(6):1107-1113.
- [78] Akçaözöglü S, Ulu C: Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials* 2014, 58:31-37.
- [79] Corinaldesi V, Donnini J, Nardinocchi A: Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials* 2015, 94:337-345.
- [80] Coppola B, Courard L, Michel F, Incarnato L, Di Maio L: Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. *Composites Part B: Engineering* 2016, 99:75-83.
- [81] Guendouz M, Debieb F, Boukendakdji O, Kadri EH, Bentchikou M, Soualhi H, Use of plastic waste in sand concrete. *J. Mater. Environ. Sci.* 20167, 2 : 382-389.
- [82] Marzouk OY, Dheilily R, Queneudec M: Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste management* 2007, 27(2):310-318.
- [83] Wang R, Meyer C: Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites* 2012, 34(9):975-981.
- [84] Juki MI, Awang M, Annas MMK, Boon KH, Othman N, Roslan MA, Khalid FS: Relationship between compressive, splitting tensile and flexural strength of concrete containing granulated waste polyethylene terephthalate (PET) bottles as fine aggregate. In: *Advanced Materials Research: 2013: Trans Tech Publ; 2013: 356-359.*
- [85] Harshad G. Patel and Sejal P. Dalal, An Experimental Investigation on Physical and Mechanical Properties of Concrete with the Replacement of Fine Aggregate by Poly Vinyl Chloride and Glass Waste. *Procedia Engineering* 2017, 173: 1666 – 1671.
- [86] Kan A, Demirbog R: A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *J. Mater. Process. Technol* 2009. 209: 2994–3000.
- [87] Haghghatnejad N, Mousavi SY, Khaleghi SJ, Tabarsa A, Yousefi S: Properties of recycled PVC aggregate concrete under different curing conditions. *Construction and Building Materials* 2016. 126: 943-950.
- [88] Azhdarpour AM, Nikoudel M, Taheri M, The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials* 2016, 109: 55–62.
- [89] Benosman AS, Taïbi H, Senhadji Y, Mouli M, Belbachir M, and Bahlouli MI: Plastic Waste Particles in Mortar Composites: Sulfate Resistance and Thermal Coefficients, *Progress in*

- Rubber. Plastics and Recycling Technology* 2017, 33(3):171-202.
- [90] Gouasmi MT, Benosman AS, Taïbi H, Belbachir M, Senhadji Y: The physico- thermal properties of mortars made of composite aggregates "PET- siliceous sand", *J. Mater. Environ. Sci.* 2016. 7 (2):409-415.
- [91] Gouasmi M, Benosman A, Taïbi H, Kazi Tani N, Belbachir M: Destructive and Non-destructive testing of an industrial screed mortar made with lightweight composite aggregates WPLA. *In:International Journal of Engineering Research in Africa: 2017: Trans Tech Publ;* 2017: 140-158.
- [92] Dweik HS, Ziara MM, Hadidoun MS: Enhancing concrete strength and thermal insulation using thermoset plastic waste. *International Journal of Polymeric Materials* 2008, 57(7):635-656.
- [93] Alonso C, Andrade C, Castellote M, Khoury GA: Microstructure – Solid Phases, Course on Effect of Heat on Concrete, *International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy*, 9-13 June 2003.
- [94] ISO834:Fire resistance tests, elements of building construction, *International Standards Organization, Genève* 1975.
- [95] Senthil Kumar K, Baskar K: Effect of Temperature and Thermal Shock on Concrete Containing Hazardous Electronic Waste. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste.* 2018, 22(2). DOI: [10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000387](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000387).
- [96] Chidiac SE, Mihaljevic SN : Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. *Cement and Concrete Composites* 2011. 33: 855-863.
- [97] Akçaözoğlu S, Atiş CD, Akçaözoğlu K: An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste management* 2010, 30(2):285-290.
- [98] Tittarelli F, Shah SP: Effect of low dosages of waste GRP dust on fresh and hardened properties of mortars: Part 1. *Construction and Building Materials* 2013. 47: 1532-1538.
- [99] Benosman AS, Taïbi H, Belbachir M, Bahlouli I, Mouli M, Senhadji Y, Houivet D, Resistance of Polymer (PET)-Mortar Composites to Chloride Penetration, *Proceedings of 7th Asian Symposium on Polymers in Concrete ASPIC 2012, Istanbul - Turkey*, 3-5 October 2012, pp.387-395.
- [100] Omrane M, Benosman A, Mouli M, Senhadji Y: Use of Thermoplastic Polymer in Mortar Composites to Improve Its Chloride Penetration Resistance. *International Journal of Engineering Research in Africa* 2016, 22.
- [101] Ghernouti Y, Rabehi B: Strength and durability of mortar made with plastics bag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials* 2012, 6(3):145-153.
- [102] Gouasmi, MT, Benosman, AS, Taïbi H: Improving the properties of waste plastic lightweight aggregates-based composite mortars in an experimental saline environment. *Asian Journal of Civil Engineering* 2018.1-15. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0089-1>.
- [103] Silva RV, de Brito J, Saikia N: Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites* 2013, 35(1):23-31.





*Chapitre II*  
*Matériaux Utilisés et*  
*Méthodes d'Essais*

## II.1 Introduction

En vue d'appréhender l'influence de la présence des agrégats de Polychlorure de Vinyle expansé (EPVC) sur le comportement des mortiers composites élaborés, on a effectué une série d'essais physiques, mécaniques, thermiques, attaques chimiques et les analyses microstructurales dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire de matériaux LABMAT du département de Génie Civil, ENPO Maurice Audin d'Oran ;
- Laboratoire Construction Transport et Protection de l'Environnement, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem ;
- Laboratoire de Catalyse et Synthèse en Chimie Organique (LCSCO), Université Abou Bekr Belkaïd (Tlemcen) ;
- Laboratoire « Eau Energie Environnement » (LR3E), Université de Sfax - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), Sfax, Tunisie ;
- Laboratoire des propriétés de la matière condensée (utilisation du MEB/EDS) de l'université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen ;
- Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions LMDC, INSA de Toulouse, France ;
- Laboratoire de Recherche Science Technologie et Génie des Procèdes (LSTGP) USTOMB ;
- Laboratoire de Biologie Botanique de l'université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen ;
- Laboratoire des essais pour mortiers et bétons prêts à l'emploi du Groupe des Sociétés HASNAOUI d'Oran.

La conception des mortiers conventionnels et les mortiers à base des agrégats de PVC expansé passe par une étude préliminaire pour choisir les matériaux de composition tels que le type de sable, le rapport E/C, ... etc. Ensuite, l'incorporation des agrégats d'EPVC a été réalisée par la substitution d'une partie du sable d'un mortier de référence.

Ce travail de recherche vise à apporter une contribution à la valorisation des déchets légers en tant qu'agrégats dans la composition des mortiers. Il s'agit de comparer l'influence de la nature d'un tel ajout (EPVC) sur les caractéristiques physiques, mécaniques, thermiques et résistance chimique de ces mortiers à court et à long terme et à différentes températures.

Tout au long de notre travail expérimental, le but est d'évaluer l'influence des agrégats composites de PVC Expansé sur la mixture granulaire à différents taux de substitution 0%, 15%, 25%, 50% et 75% de l'agrégat conventionnel (naturel).

Pour la série d'essais et les résultats obtenus, on s'est surtout intéressé à l'évolution des caractéristiques des composites LMEPVC à l'état frais et durci en fonction de la variation des paramètres essentiels (teneur d'agrégat composite, âge des éprouvettes, ...etc.).

Afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitables, il a été nécessaire dans la seconde série de réaliser des essais d'identification microstructurale. Dans ce but, on a fait appel à des observations au MOP et MEB, la diffraction aux rayons X et la spectrométrie IRTF.

## II.2. Matériaux utilisés

### II.2.1. Le ciment

Il s'agit d'un ciment Portland composé CPJ-CEM II/A-L 42.5 provenant de l'usine de LCO du groupe Lafarge sise à Ogar (située au Nord-Ouest de l'Algérie). Ce ciment a une finesse de  $4180 \text{ cm}^2/\text{g}$ , de densité de 3,12 et d'une résistance à la compression de 45,2 MPa à 28 jours. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ciment sont données par les tableaux II.1 et II.2.

**Tableau II.1 :** Composition chimique du ciment CPJ-CEM II/A-L 42.5.

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	PAF	Cl-
Pourcentages	16,01	3,75	2,37	60,25	1,76	0,26	2,64	0,09	12,11	0,03

**Tableau II.2 :** Composition minéralogique du clinker (%).

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
64	15	8	12,16

### II.2.2. Le sable

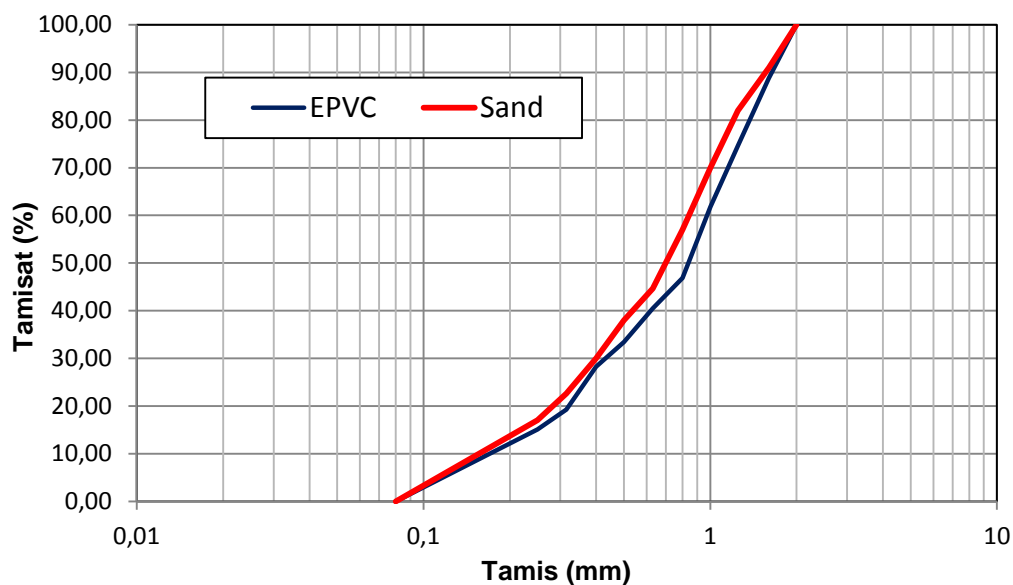
On a utilisé un sable de carrière de fraction 0/2 provenant des carrières SECH Spa du Groupe des sociétés HASNAOUI sise à Sidi Ali Benyoub Wilaya de Sidi Bel Abbés. Avant son utilisation, nous avons effectué une correction granulaire de ce sable par un sable de mer afin d'avoir une granulométrie continue conformément au fuseau du sable normalisé (Figure II.1). Ses principales caractéristiques physiques et chimiques sont regroupées dans les tableaux II.3 et II.4, respectivement.

**Tableau II.3 :** Paramètres physiques du sable utilisé.

Paramètres Physiques	Sable utilisé
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,30
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,40
Equivalent du sable (%)	77,00
Module de finesse	2,37
Coefficient d'absorption (%)	0,56
Coefficient de courbure: Cc	1,10
Coefficient d'uniformité: Cu	5,00

**Tableau II.4 :** Compositions chimiques de sable utilisé.

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
Taux (%)	28,15	0,15	2,99	42,06	0,00	74,76	32,89

**Figure II.1 :** L'analyse granulométrique du sable et des agrégats d'EPVC.

### II.2.3. L'agrégat de PVC expansé (EPVC)

Le but initial de ce travail est la revalorisation des déchets des plaques composites de FOREX -EPVC- (*Expanded Polyvinyl Chloride*) (Figure II.2(a)), en résorbant le maximum possible de ces déchets dans un matériau composite qui donnera par la suite un mortier composite léger LMEPVC conforme pour son application dans la construction. Les agrégats

sont obtenus par le broyage des plaques de 4 mm d'épaisseur avec un diamètre maximum de 2 mm (Figure II.2(b)). Ces propriétés physiques sont exhibées par le tableau II.5.



(a)

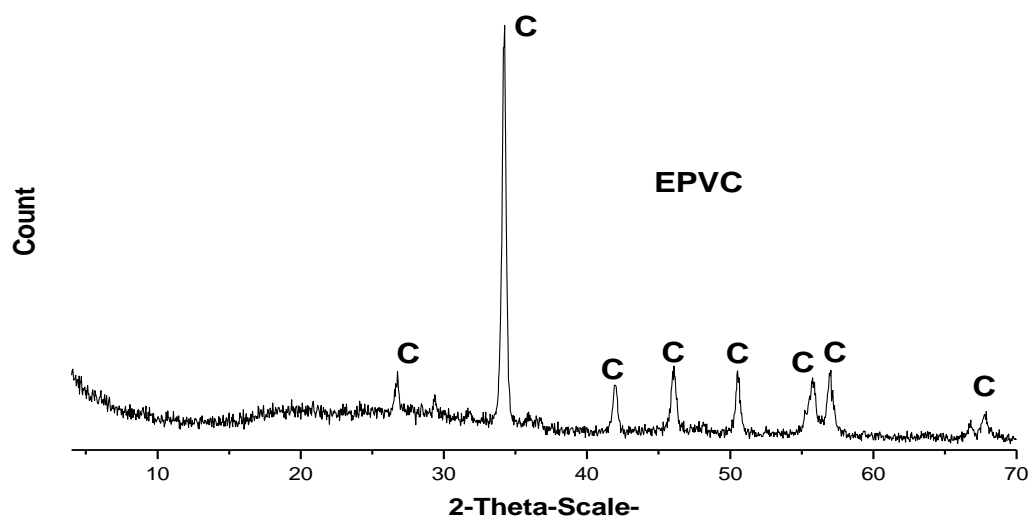
(b)

**Figure II.2 :** (a) Les plaques d'EPVC (b) Le déchets en EPVC.

**Tableau II.5 :** Paramètres physiques des agrégats d'EPVC.

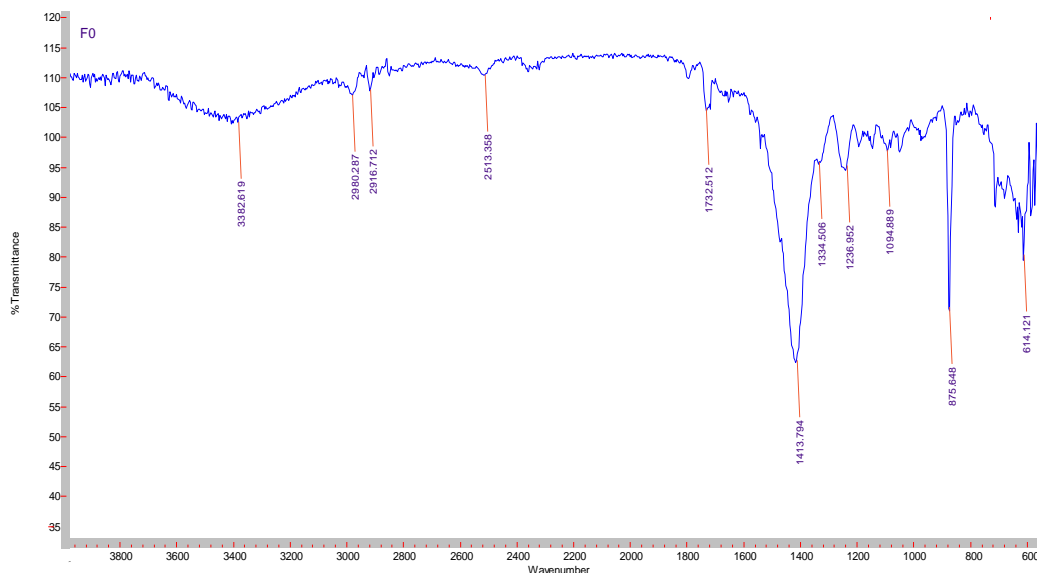
Paramètres Physiques	EPVC
Masse volumique absolue ( $\text{g/cm}^3$ )	0,450
Masse volumique apparente ( $\text{g/cm}^3$ )	0,218
Equivalent du sable « % »	65,00
Module de finesse « $M_f$ »	2,50
Coefficient d'absorption (%)	1,00>
Coefficient de courbure: « $C_c$ »	1,34
Coefficient d'uniformité: « $C_u$ »	6,60
La conductivité thermique « $\lambda$ » W/m.K	0,081

La figure II.3 montre l'analyse par DRX des particules de l'EPVC. Ce spectre indique bien la présence des cristaux de la calcite. L'identification du spectre de l'EPVC, nous permettra de constater par-là suite s'il existe une interaction entre la matrice cimentaire et l'agrégat d'EPVC.



**Figure II.3 :** Spectre DRX des agrégats d'EPVC, (C: calcite  $\text{CaCO}_3$ ).

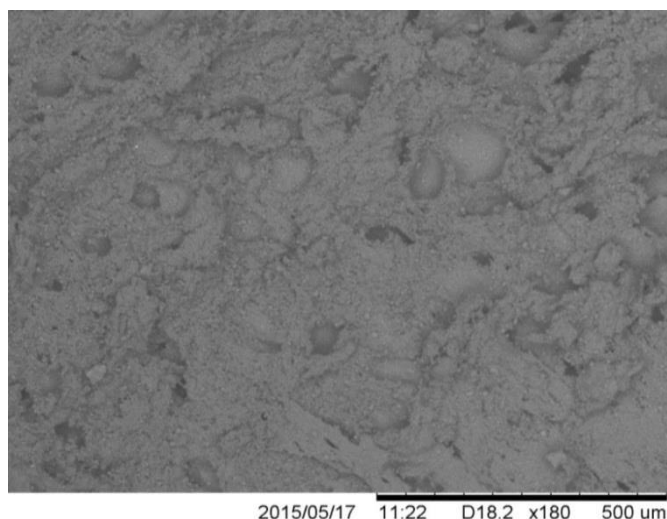
La figure II.4 montre l'analyse par l'IRTF des particules de l'EPVC (Forex à base de 21% de la calcite). On constate l'apparition de trois bandes caractéristiques vers :  $1413,8 \text{ cm}^{-1}$  ;  $875,7 \text{ cm}^{-1}$  et  $614,13 \text{ cm}^{-1}$  attribuées à la présence de la calcite.



**Figure II.4 :** Spectre IRTF des particules en EPVC.

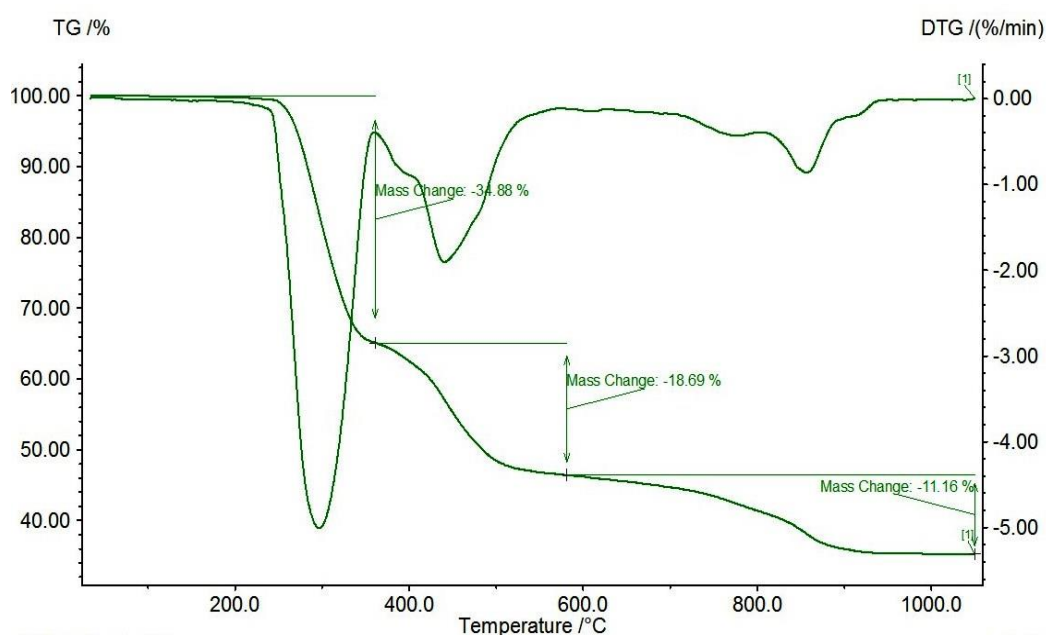
L'objectif de l'analyse MEB est de visualiser la morphologie de l'EPVC et de l'identifier lors de la cohésion « matrice-agrégats ». L'image présente une forme irrégulière et poreuse de l'aspect microstructural des particules en EPVC (Figure II.5).





**Figure II.5 :** Image MEB des agrégats d'EPVC.

La figure II.6 présente les résultats d'analyse thermogravimétrique (TG/DTG) des granulats d'EPVC. L'analyse thermogravimétrique (TG/DTG) mesure les variations du poids dans un matériau en fonction de la température. Ses utilisations principales, comprennent la mesure de la stabilité thermique et la composition d'un matériau.



**Figure II.6 :** Courbes TG/DTG des agrégats d'EPVC.

L'analyse TG/DTG est utilisée pour mettre en évidence la dégradation d'EPVC à base de 21% de la calcite (matériau composite) sous l'effet de la température (Figure II.6). Son point de fusion est d'environ 850-870°C montré par le pic endogène du thermogramme. Les

pics vers 300°C et 420°C caractérisent l'oxydation des additifs secondaires constituant les particules du polychlorure de vinyle expansé lui-même.

#### II.2.4. Superplastifiant

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau, de type SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 à base de copolymère acrylique, a été employé pour assurer une maniabilité satisfaisante pour les différentes formulations, conformément à la norme NF EN 934-2 [1]. Le superplastifiant utilisé à une densité de 1,06, un pH de 5 et un extrait sec de 30 %.

#### II.3. Elaboration des mortiers composites légers LMEPVC

Les mortiers légers LMEPVC (Lightweight Mortar based Expanded PVC) sont réalisés par le remplacement du sable en volume avec des teneurs en déchets d'EPVC suivant les pourcentages de : EPVC/S (0; 15; 25; 50 & 75%<sup>V</sup>).

Le mortier a été confectionné selon la proportion en masse suivante: (1 part de ciment, 3 parts du sable et un rapport eau sur ciment E/C = 0,5 constant pour l'ensemble des mortiers). Le détail des compositions des combinaisons est présenté dans le tableau II.6.

Les mortiers composites confectionnés seront désignés en fonction de leurs teneurs en agrégat composite EPVC d'où ils seront notés : LMEPVC X, Ou X est la proportion de l'agrégat d'EPVC.

- NWM (Normal Weight Mortar): mortier ne contenant que l'agrégat conventionnel (sable naturel).
- LMEPVC15 : mortier contenant 15% d'agrégats d'EPVC.
- LMEPVC25 : mortier contenant 25% d'agrégats d'EPVC.
- LMEPVC50 : mortier contenant 50 % d'agrégats d'EPVC.
- LMEPVC75 : mortier contenant 75% d'agrégats d'EPVC.

Tableau II.6 : Composition des mortiers légers LMEPVC.

Composites	EPVC/S (%) *	Mélange de sable (g)		SP (%) **	Ciment (g)	E/C	Maniabilité (%)
		EPVC	Sable				
NWM	0	0,00	1350,0	1,00	450	0,5	70
LMEPVC15	15	26,88	1148,0	0,90	450	0,5	75
LMEPVC25	25	44,91	1012,5	0,80	450	0,5	70
LMEPVC50	50	89,90	675,0	0,60	450	0,5	65
LMEPVC75	75	134,75	337,5	0,45	450	0,5	65

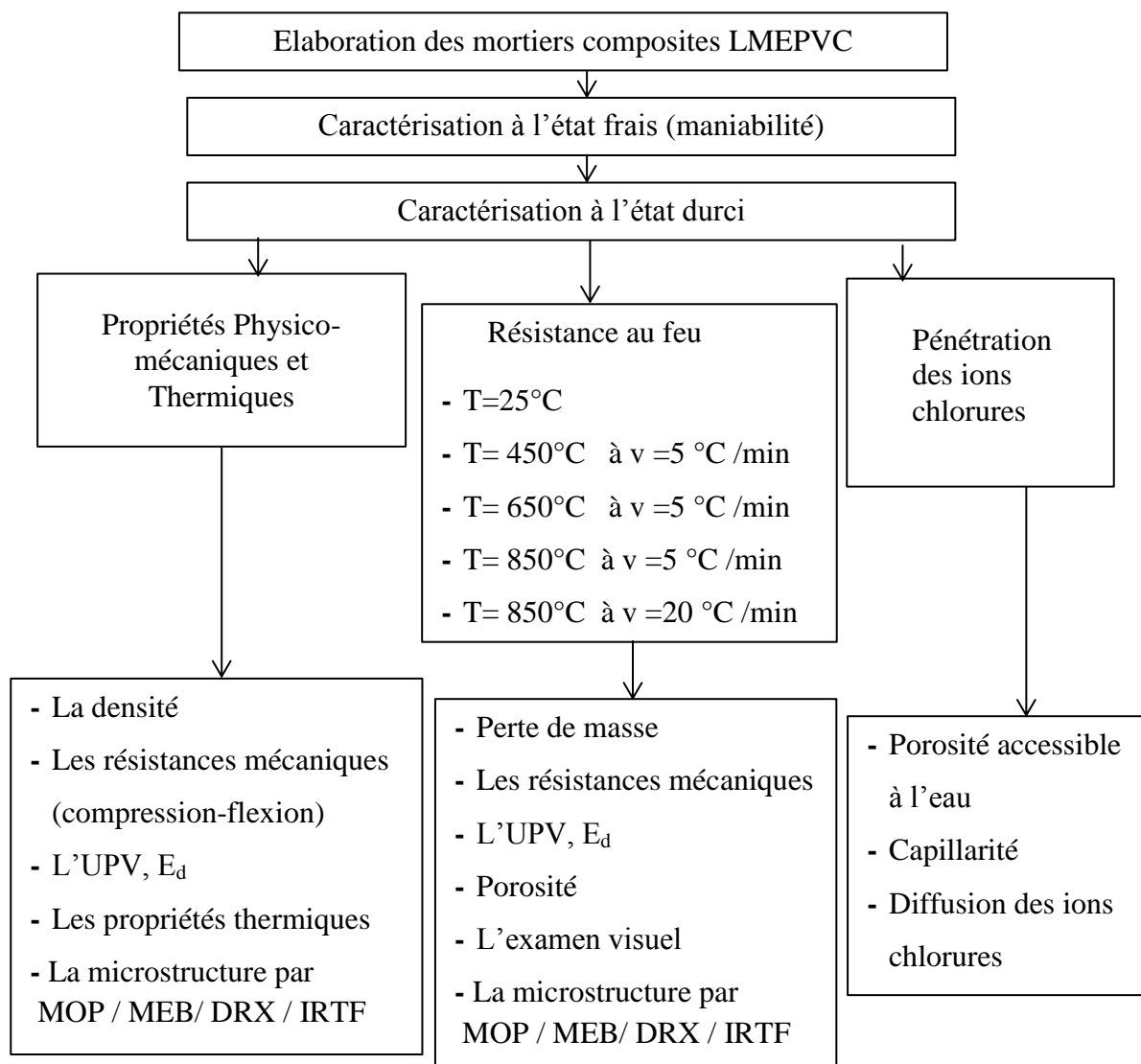
\* : La substitution du sable en volume par l'EPVC.

\*\* : Pourcentage de l'adjuvant superplastifiant par rapport au poids du ciment.

Les différents mortiers ont été coulés dans des moules prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc NF EN 196-1 [2]. Les moules ont été couverts de film plastique et stockés dans l'environnement du laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés jusqu'à l'âge de l'essai dans l'environnement suivant : eau saturée en chaux : ( $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , HR = 100%).

Les valeurs obtenues des différents essais sont la moyenne de trois essais conformément aux normes mentionnées.

Le mortier à l'état frais et durci a fait l'objet des essais présentés selon l'organigramme suivant (Figure II.7).



**Figure II.7 :** Organigramme résumant le travail expérimental mené dans cette étude.

#### II.4. Essai de maniabilité sur mortiers frais (Flow Test)

Pour chaque type de mortier formulé, on mesure sa maniabilité grâce à la table d'étalement (figure II.8) et conformément à la norme ASTM C 1437 [3] ; en mesurant, ainsi, le diamètre du mortier le long des quatre lignes tracées dans le dessus de la table ( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  et  $D_4$ ).

$$L'etalement(mm) = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}{4} - 100$$

Avec  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  et  $D_4$  en mm. L'étalement est arrondi au mm le plus proche.



**Figure II.8 :** Table d'étalement des mortiers, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'ORAN.

## II.5. Technique expérimentale

### II.5.1. Essais de caractérisation mécanique

#### II.5.1.1 Mesure des résistances mécaniques

Des essais mécaniques selon la norme EN 196-1 [2] sont utilisés pour caractériser les mortiers à différentes échéances : 3, 7, 14, 28, 90 et 180 jours.

##### ➤ Essai de résistance à la flexion

Cet essai est réalisé sur l'appareil de type control pourvus d'un dispositif de flexion par trois points (Figure II.9).



**Figure II.9 :** Presse pour mortier, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'Oran.

Une fois l'éprouvette retirée de son milieu de conservation, on l'essuie avec un tissu sec et on la laisse pendant 2 heures à l'air libre du laboratoire. On la place dans la cellule

d'écrasement de l'appareil en appliquant un taux de chargement à une vitesse de déplacement relative entre la platine supérieure et inférieure correspondant à une vitesse de chargement sur l'éprouvette de 900 à 1800N/s.



**Figure II.10 :** Dispositif pour l'essai de la résistance à la flexion.

### ➤ Essai de résistance à la compression

Les demi-éprouvettes issues de l'essai de la flexion sont alors sollicitées en compression simple. Ils sont placés dans la cellule d'écrasement de la presse hydraulique en appliquant un taux de chargement à une vitesse de déplacement relative entre la platine supérieure et inférieure correspondant à une vitesse de chargement sur le spécimen de 1000 N/S (figure II.11).



**Figure II.11 :** Dispositif pour l'essai de la résistance à la compression.



### II.5.1.2. Essai d'ultrason (Ultrasonic pulse velocity test) –UPV-

L'essai de l'ultrason fait partie des essais non destructifs. Cet essai caractérise le temps que met une onde sonore pour traverser une épaisseur connue du matériau afin de déterminer la vitesse. Les mesures ont été effectuées selon la norme ASTM C597-02 [4] en utilisant un appareil *punditlab* (Figure II.12).



**Figure II.12 :** Appareil d'essai d'ultrason, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'ORAN.

### II.5.1.3. Détermination du module d'élasticité dynamique

Pour remédier à des problèmes des méthodes statiques qui en général s'avèrent destructives ; des méthodes de caractérisation non destructive dites dynamiques se présentent comme un moyen capital pour déterminer le module d'élasticité des matériaux.

Le principe du calcul du module d'élasticité dynamique est basé sur la détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les composites LMEPVCs. Le module d'élasticité dynamique est obtenu à partir de l'expression suivante [5], (Eq.II.1):

$$E_d = \frac{V^2 \rho}{g} \times 10^{-2} \quad (\text{Eq. II. 1}).$$

Où :  $E_d$  : Module d'élasticité dynamique (GPa) ;

$V$  : UPV (Km/S);

$\rho$  : la densité (Kg/m<sup>3</sup>) et  $g$  : accélération gravitaire (9,81m/s).I

## II.5.2.Essais de caractérisation physico-thermique

### II.5.2.1. Densité à l'état sec

La densité à l'état sec ( $\rho_d$ ) est calculée selon la norme NF EN 18-459 [6]. L'échantillon est séché dans une étuve à 60 °C pendant 15 jours jusqu'à la stabilisation de la

masse. La valeur de la densité sèche est calculée en utilisant les formules (Eq.II.2) et (Eq.II.3).

$$V = \frac{M_{air} - M_{sat}}{\rho_{water}} \quad (\text{Eq. II. 2}).$$

$$\rho_d = \frac{M_d}{V} \quad (\text{Eq. II. 3}).$$

Où:  $M_{air}$  : la masse d'échantillon saturé à l'air;  
 $M_{sat}$  : la masse d'échantillon saturé à l'eau;  
 $\rho_d$  : la densité de l'eau et  $V$ = volume total.

### II.5.2.2. Porosité accessible à l'eau

Le suivi de l'évolution de la porosité et la masse volumique réelle des différents mortiers LMEPVC est effectué sur trois éprouvettes cubiques ( $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ) issues du même mortier. La préparation et la conservation des éprouvettes ont été faites dans les mêmes conditions que celles destinées aux essais de la résistance à la compression.

Le principe de cet essai consiste à déterminer le volume des pores d'un échantillon en mesurant le volume d'eau pénétré dans ces dernières.

La porosité « Pa » est calculée selon la norme NF EN 18-459 [6] en utilisant la formule (Eq.II.4).

$$P_a = \frac{M_{air} - M_d}{V} \quad (\text{Eq. II. 4}).$$

Où:  $M_{air}$  : la masse d'échantillon saturé à l'air;  
 $M_d$  : la masse d'échantillon à l'état sec  
 $V$ = volume total.

Les valeurs moyennes de la porosité accessible à l'eau sont mesurées après 28 et 90 jours de cure.

### II.5.2.3. Absorption capillaire -Sorptivité-

Cet essai, mesure le taux d'absorption de l'eau par succions capillaires des mortiers composites LMEPVCs, non saturées, mises en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures de la sorptivité, les éprouvettes seront pré-conditionnées dans l'étuve à

environ 105°C jusqu'à une masse constante. L'essai de la sorptivité a été effectué selon la norme ASTM C1585-13[7]. La sorptivité détermine le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette cubique de dimensions 50×50×50 mm<sup>3</sup> sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau suivant le schéma indiqué dans la figure II.13. de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette qu'à une hauteur de 5 mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé sur toutes les autres faces (Figure II.14) On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (exprimé en minutes) à 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 et 64 minutes.



Figure II.13 : Epreuves imperméabilisées.

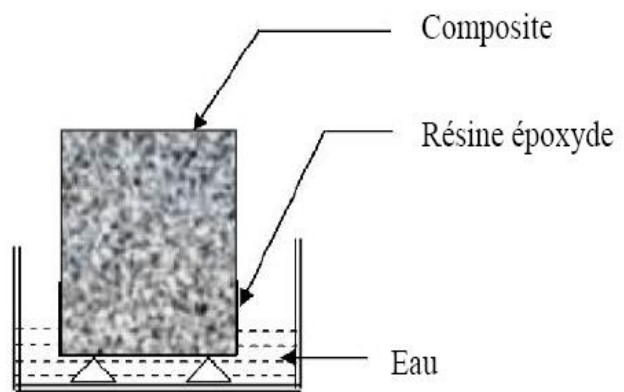


Figure II.14: Schéma du dispositif de l'essai d'absorption capillaire.

Les résultats de l'essai de la sorptivité des différents mortiers, sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps. L'équation de ces droites à la forme (Eq. II. 5) :

$$S = I/\sqrt{t} \tag{Eq. II. 5}.$$

$S$  : le coefficient de sorptivité du spécimen (cm/s<sup>1/2</sup>) ;

$t$  : le temps (s) ;

$I$  : La quantité d'eau cumulée absorbée par l'unité de surface en (cm) ;

$$I = m_t/(A \times \rho) \tag{Eq. II. 6}.$$

$m_t$  : l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (g) ;

$A$  : la surface du spécimen en contact avec l'eau (cm<sup>2</sup>) ;

$\rho$  : la densité de l'eau en (g/cm<sup>3</sup>).

#### II.5.2.4. Essai des propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des composites LMEPVCs sont mesurées en utilisant l'appareil ISOMET Quickline 30 du laboratoire LABMAT à l'ENP d'ORAN (Figure II.15) suivant la norme ISO 8302-91 [8]. L'essai permet de mesurer la conductivité thermique, la capacité calorifique et la diffusivité thermique des composites LMEPVCs après le séchage à une température de  $100 \pm 3$  °C.

Les propriétés thermiques de l'échantillon sont mesurées en utilisant la sonde qui contient une bobine de chauffage. Le principe de la sonde est de produire localement un échauffement faible du matériau (quelques degrés au-dessus de la température ambiante) et de mesurer cette élévation de température au cours du temps (durée de quelques minutes).



**Figure II.15 :** Appareil ISOMET Quickline 30, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'ORAN.

#### II.5.3. Essai de chauffage-refroidissement

Différents essais d'exposition thermique ont été effectués dans un four électrique programmable PROTHERM FURNACES (Figure II.16), de puissance 3.6 kW et pouvant atteindre une température maximale de 1100°C. Les cycles du chauffage réalisés ont été programmés à travers leur tableau de commande qui permet de réaliser un programme prédéfini par l'opérateur (cycles de chauffage, paliers de stabilisation de la température et leur durée, vitesse de montée en température). La température à l'intérieur du four était lue directement sur leur tableau de commande. Le four est équipé d'un dispositif de thermocouple qui permet de suivre les changements de température.



**Figure II.16 :** Four électrique, (Laboratoire LABMAT) à l'ENP d'ORAN.

Toutes les éprouvettes des mortiers composites LMEPVC retenues pour cette étude sont testées après 365 jours d'âge. Nous appliquons trois cycles de chauffage-refroidissement de 25°C à différentes températures: 450°C, 650°C et 850°C. Ces températures d'exposition sont choisies à partir de l'analyse TG/DTG de l'agrégat de l'EPVC (Figure II.6).

Des éprouvettes prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) sont disposées au milieu du four de façon à avoir une exposition à la chaleur homogène (Figure II.17).



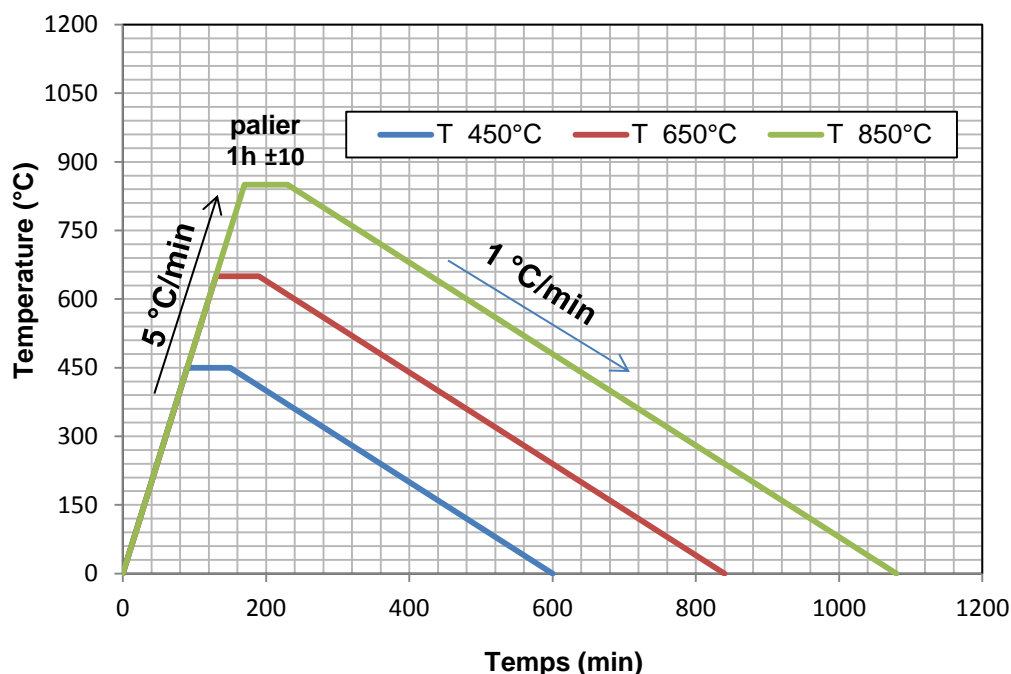
**Figure II.17 :** Disposition des éprouvettes dans le four.

Le cycle thermique est composé de trois phases. La première : la phase de chauffage avec une vitesse de 5 °C/min. La seconde : il s'agit d'un palier de température de traitement constante qui dure de 1h  $\pm$ 10 afin d'assurer l'homogénéité de la température au sein de l'échantillon. La dernière c'était la phase correspond au refroidissement libre qui se réalise par la diminution de la température du palier jusqu' à atteindre la température ambiante. Le

tableau II.7 et la figure II.18 dressent un récapitulatif des différents cycles thermiques appliqués aux mortiers composites LMEPVC.

**Tableau II.7 :** Les différents cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux différents types de mortier LMEPVC.

Températures du palier (°C)	Vitesse de montée (°C/min)	Durée du cycle (h)	Refroidissement (°C/min)
450°C	5	10	Libre
650°C	5	14	Libre
850°C	5	18	Libre



**Figure II.18 :** Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 5°C/min).

## II.6. Caractérisation microstructurale des LMEPVCs à l'état durci

L'introduction de l'agrégat composite EPVC à la gâchée d'un mortier peut modifier ses propriétés mécaniques, chimiques et physiques. Notre objectif est d'essayer d'analyser qualitativement la matrice cimentaire des mortiers composites LMEPVC. Pour cela, on a réalisé des observations aux MOP et MEB avec des analyses par DRX et l'IRTF.



### II.6.1. Microscope optique MOP

La microscopie optique est une technique optique de mesure qui permet d'obtenir une image agrandie d'objets, tels que les matériaux cimentaires, et de voir des détails invisibles à l'œil nu.

Les échantillons sont analysés par un microscope optique présenté sur la figure II.19, disponible au laboratoire de Biologie Botanique de l'université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.



**Figure II.19 :** Microscope optique du Laboratoire de Biologie Botanique de l'université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

### II.6.2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM : *Scanning Electron Microscopy*) est une technique d'observation capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Le principe de base du MEB consiste à utiliser les électrons émis par la surface d'un solide lorsqu'elle est bombardée par un faisceau d'électrons dont l'énergie est de l'ordre de quelque Kev [9].

Dans notre étude, nous avons utilisé deux appareils MEB : un microscope électronique à balayage, type « HITACHI TM-1000 », (figure II.20.a), du Laboratoire des propriétés de la matière condensée (utilisation du MEB/EDS) de l'université Abou Bekr Belkaïd (Tlemcen) pour la caractérisation de l'ITZ des différents échantillons. Pour l'étude des composites LMEPVCs sous l'influence de hautes températures, un autre type de MEB a été utilisé : « Hirox SH-4000M » du Laboratoire de Recherche Science Technologie et Génie des Procèdes (LSTGP) de l'université USTOMB, (figure II.20.b).



(a)

(b)

**Figure II.20 :** (a) Appareil de MEB, «HITACHI TM-1000» (Laboratoire des propriétés de la matière condensée MEB/EDS) (Tlemcen).

(b) Appareil de MEB, « Hirox SH-4000M » (Laboratoire LSTGP) (USTOMB) (Oran).

### II.6.3. Diffraction des rayons X (DRX)

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique qui ne fonctionne que sur des matériaux composés d'un nombre relativement important de cristaux aux orientations non préférentielles tels que les minéraux, les métaux et les produits organiques cristallisés. Dans le cas d'une poudre de ciment hydraté, cette technique permet donc de déterminer les cristaux présents dans l'échantillon ainsi que les espèces anhydres et les hydrates [10].

Pour déterminer les cristaux présents dans les échantillons des mortiers composites LMEPVCs après l'hydratation, des analyses DRX ont été faites à l'université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen par un appareil Rigaku, (MiniFlex 600) en utilisant une anticathode de cuivre (type Cu-K $\alpha$ ),  $2\theta$  entre 4 - 60° et un pas de 0,04 avec une vitesse de 5°/min (Figure II.21).



**Figure II.21 :** Appareil de DRX, (Laboratoire LCSCO) (Tlemcen).

Après l'exposition à haute température, Les échantillons sont analysés par un diffractomètre Bruker, D8 ADVANCE, utilisant une anticathode de cuivre ( $\text{Cu-K}\alpha$ ),  $2\theta$  de 2 à  $60^\circ$  et un pas de 0,02 avec une vitesse de 2s/pas (Figure II.22), disponible au Laboratoire « Eau Energie Environnement » (LR3E), Université de Sfax - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), Sfax, Tunisie.



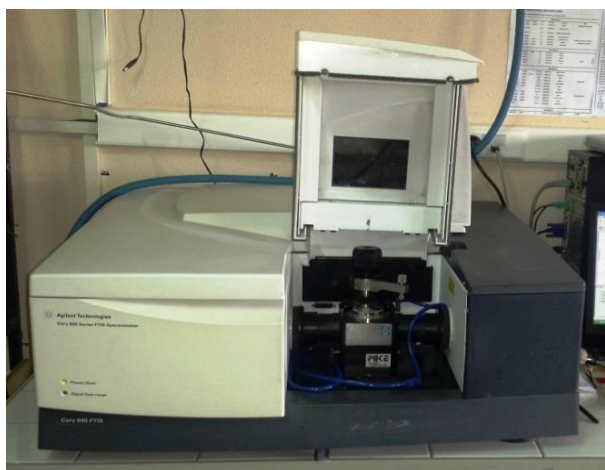
**Figure II.22 :** Appareil de DRX, (Laboratoire LR3E) (Tunisie).

### II.6.4. Spectrométrie infrarouge (IRTF)

La technique de spectroscopie IR est souvent utilisée comme outil de base pour la caractérisation physico-chimique des matériaux organiques. Mais dès qu'il s'agit d'élucider la structure d'une espèce minérale, nous avons peu de spectres de référence à notre disposition.

Les radiations infrarouges facilitent les transitions entre niveau d'énergie de vibration des liaisons atomiques. Actuellement, l'analyse par IRTF semble être utilisée pour suivre le comportement des ciments dans des conditions particulières [11].

En spectroscopie infrarouge, nous avons utilisé deux types d'appareils IRTF : un appareil IRTF de type Agilent Technologies Cary 600 series FTIR Spectrometer, à l'université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen (Laboratoire LCSCO) (figure II.23.a) ; et un autre type, il s'agit d'un spectromètre infrarouge Agilent Technologies Cary 630 FTIR (figure II.23.b), disponible au Laboratoire « Eau Energie Environnement » (LR3E), Université de Sfax - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), Sfax, Tunisie.



(a)



(b)

**Figure II.23 :** (a) Appareil de l'IRTF, (Laboratoire LCSCO) (Tlemcen) ;  
(b) Appareil de l'IRTF, (Laboratoire LR3E) (Tunisie).

### II.7. Test de pénétration d'ion chlore

L'attaque par les chlorures se distingue par le fait qu'elle entraîne la corrosion des armatures et qu'ensuite, comme conséquence de ce phénomène, le béton environnant est dégradé.



La résistance à la pénétration des ions chlorures a été déterminée selon la norme UNI 7928 [12]. Les éprouvettes traitées ( $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ) ont été immergées dans des solutions d'essai à  $20^\circ\text{C}$  pendant 7, 28 et 91 jours.

Après la cure, les faces latérales des échantillons sont recouvertes par la résine d'époxy pour rendre les facettes imperméables (Figure II.25). Ainsi, la pénétration des ions chlorures ne se fait que dans un seul sens selon les deux faces, ensuite les échantillons sont introduits dans une solution de NaCl de concentration de 5% (Figure II.24). La solution chlorure de sodium NaCl a été changée tous les 7 jours jusqu'à une période d'immersion de 28 jours, et puis tous les 28 jours.

A chaque essai (7, 28 et 91 jours) l'éprouvette sera coupée en deux le long des deux faces perméables c'est-à-dire suivant le flux de la diffusion des chlorures (Figure II.26), puis on verse sur chaque section coupée une solution de nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$ . Le bord de chaque section change de couleur, on obtient une couleur blanche qui représente la profondeur de la pénétration des ions chlorures. Cette profondeur est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse sur plusieurs positions (Figure II.27). La profondeur de la pénétration (X) est la moyenne de toutes les lectures.



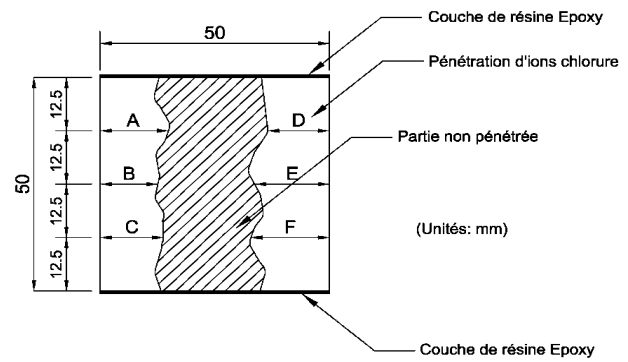
**Figure II.24:** Immersion totale des échantillons des composites LMEPVCs dans une solution de 5% NaCl jusqu'au 7, 28 et 91 jours.



**Figure II.25:** Echantillon avant l'immersion dans la solution NaCl à 5%.



**Figure II.26:** Coupe de l'éprouvette en deux parties, le jour de l'essai.



Coupe schématique de l'échantillon (unité en mm)

**Figure II.27 :** Section transversale d'éprouvette après avoir employé 0.1 N de l'essai d'indicateur de nitrate d'argent.

## II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés et le détail des différentes formulations élaborées, ainsi que les différentes méthodes d'essais dans le cadre de cette étude.

Les performances des différents mortiers LMEPVC ont été définies : certains sont liés au domaine physico-mécanique et d'autres concernent les propriétés thermiques. On pourra, donc, apercevoir si ces propriétés tendent à s'améliorer par l'introduction de l'EPVC. La résistance au feu des composites a été établie pour évaluer les résistances des composites à haute température. De même, des essais de la porosité, la capillarité et de la résistance à la pénétration des ions chlorures ont été faites. Les analyses complémentaires (MOP/MEB/DRX/IRTF) permettront d'arriver à des conclusions sur la microstructure de nos échantillons.

Dans le chapitre qui suit, on essaiera de présenter les résultats obtenus du comportement physico-mécanique et thermique des mortiers composites légers LMEPVC à température ambiante, à court et à long terme.



### Références bibliographiques

- [1] EN T: 934-2 “Admixtures For Concrete, Mortar and Grout-Part 2: Concrete Admixtures;Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling”. *British Standards Institution,London* 2009.
- [2] EN T: 196-1. *Methods of testing cement*-Part 2006, 1.
- [3] ASTM C 1437-01, « *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar* », 2001.
- [4] ASTM: C 597, Standard test method for pulse velocity through concrete. *ASTM International,West Conshohocken, PA* 2009.
- [5] Gupta T, Chaudhary S, Sharma RK: Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *Journal of Cleaner Production* 2016, 112:702-711.
- [6] la norme NF EN 18-459 : Béton - *Essai pour béton durci* - Essai de porosité et de masse volumique. Mars 2010.
- [7] ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, *ASTM International, West Conshohocken, PA*,2013.[www.astm.org](http://www.astm.org).
- [8] ISO 8302, Thermal insulation: Determination of steady-state thermal resistance and related properties - *Guarded hot plate apparatus* 1991.
- [9] Baron J, Sautery R, Le béton hydraulique, Ed. *Presses de l'Ecole nationale des ponts et Chaussées* 1982, 560 pages.
- [10] Benosman AS, Taibi H, Mouli M, Belbachir M, La diffraction des rayons X: une méthode intéressante pour la caractérisation de composés du ciment anhydre, argile naturelle et des mélanges ciment anhydre/argile naturelle, *Revue technologique, scientifique et linguistique, Communication Science & Technologie COST2006*, (ISSN 1112-5178), 4 : 23-30.
- [11] Benosman AS, Taibi H, Mouli M, Belbachir M, Application of Infrared Fourier Transform (IRTF) Spectrometry for Characterizing Anhydrous Cement and the Hydration of Polymer-Mortar Composites, *Phys. Chem. News (PCN)*, 2005, 26: 109-117.
- [12] 79287 U: Concrete-determination of the ion chloride penetration. In. Milano, piazza A. Diaz, 2.: *UNI-Ente Nazionale Italiano Di Unificazione* 1978.

*Chapitre III*

*Propriétés Physico-Mécaniques  
et Thermiques des Mortiers*

*Légers LMEPVC*

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus à partir des différents essais cités dans la partie II. On a caractérisé le comportement physico-mécanique à l'état frais et durci tels que les résistances mécaniques des mortiers avec et sans ajout des agrégats légers de plaques de PVC expansé (EPVC) ainsi que les masses volumiques à l'état durcis. On présente, aussi, les résultats de la vitesse d'impulsion des ondes sonores UPV, le module d'élasticité dynamique  $E_d$  avec les caractérisations thermiques tels que la mesure de la conductivité thermique  $\lambda$  à différents âge de cure. Afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitable, il a été nécessaire d'introduire des analyses microstructurales tel que le DRX, l'IRTF et le MOP et le MEB. Ces analyses identifient les effets de l'EPVC sur la matrice cimentaire et la jonction ou l'adhérence agrégat-matrice au sein d'un mortier composite. Nos résultats ont été comparés avec ceux de la littérature.

### III.2. Maniabilité sur mortiers frais (Flow Test)

Pour chaque type de mortier formulé, on mesure sa maniabilité grâce à la table d'étalement, conformément à la norme ASTM C 1437 [1].

Les résultats des essais sur la maniabilité sont illustrés dans la figure III.1.

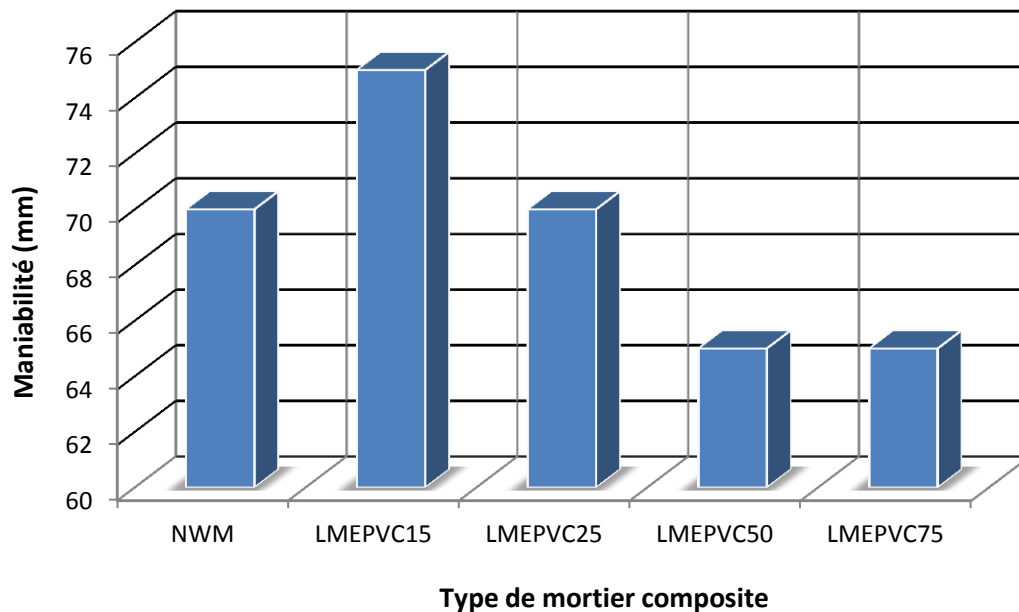


Figure III.1 : Maniabilité des différents mortiers.

D'après les résultats recueillis : on a déduit qu'au fur et à mesure que le taux de l'agrégat composite EPVC augmente, on a une diminution de la maniabilité. Elle peut atteindre les 8% en moins pour le LMEPVC75 par rapport au NWM.

En effet, lorsque les agrégats modifient considérablement le besoin d'eau dans les mélanges cimentaires ou ne parviennent pas à remplir les porosités du squelette granulaire, l'effet granulaire devient dans ce cas, défavorable. Plusieurs études rapportent que les agrégats légers diminuent la maniabilité, d'où l'augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance normale des pâtes de liant [2, 3]. Afin d'obtenir des consistances voisines de celles d'un mortier normalisé, on a maintenu le rapport E/C constant en ajustant la maniabilité par l'utilisation d'un superplastifiant.

### III.3. Densité à l'état durci

Les pesées effectuées pour chaque éprouvette, nous ont permis d'étudier l'évolution de la densité pour toutes les compositions de mortiers testés. La valeur de la densité à l'état sec retenue, correspond à la moyenne des pesées effectuées sur trois échantillons d'une même gâchée, et ceci pour chaque type de mode de conservations.

La variation de la densité à l'état sec des mortiers composites au 28<sup>ème</sup> jour en fonction de la teneur en particules d'EPVC, est donnée par la figure III.2. Celle-ci, elle diminue avec l'augmentation de la teneur en EPVC. Car la masse volumique apparente d'EPVC ( $\rho=0,218 \text{ g/cm}^3$ ) est inférieure à celle des agrégats naturels ( $\rho=1,4 \text{ g/cm}^3$ ) par un taux de réduction de 84,5%.

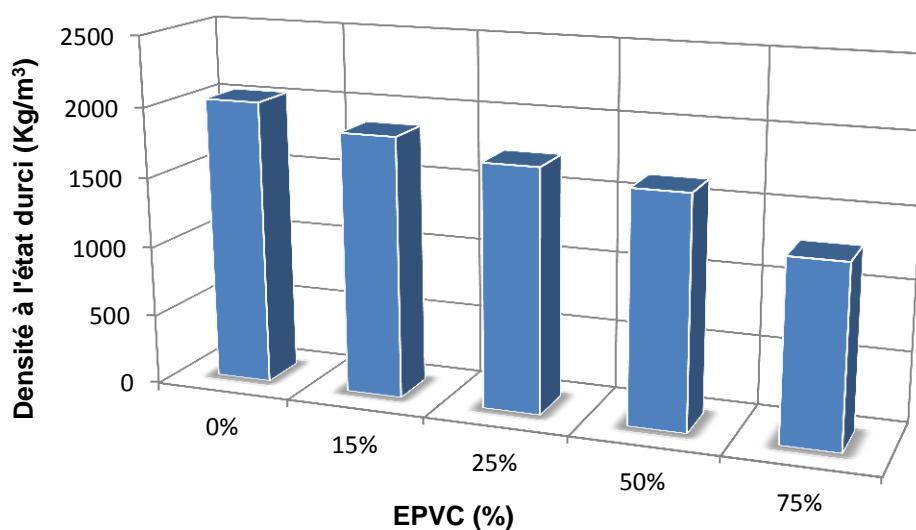


Figure III.2 : La densité à l'état durci des mortiers légers LMEPVCs à 28 jours.

Pour une substitution du sable naturel par l'agrégat en EPVC, allant de 15 à 75%, nous avons un allègement entre 10 à 40% par rapport au mortier témoin NWM. Cette propriété est particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et de restauration du vieux bâti et dans l'allègement des structures.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par certains auteurs concernant le remplacement volumique partiel du sable naturel par des granulats légers dans les matériaux cimentaires [4, 5, 6, 7].

Kismi et al. [7] ont travaillé sur l'incorporation des déchets de mousse de polyuréthane rigide (PUR) et des déchets de polystyrène expansé (PSE) comme granulats dans les mortiers, ils ont également constatés une diminution de la densité de 45% et 11% des mélanges de mortier contenant 50% des agrégats en PSE et PUR, respectivement.

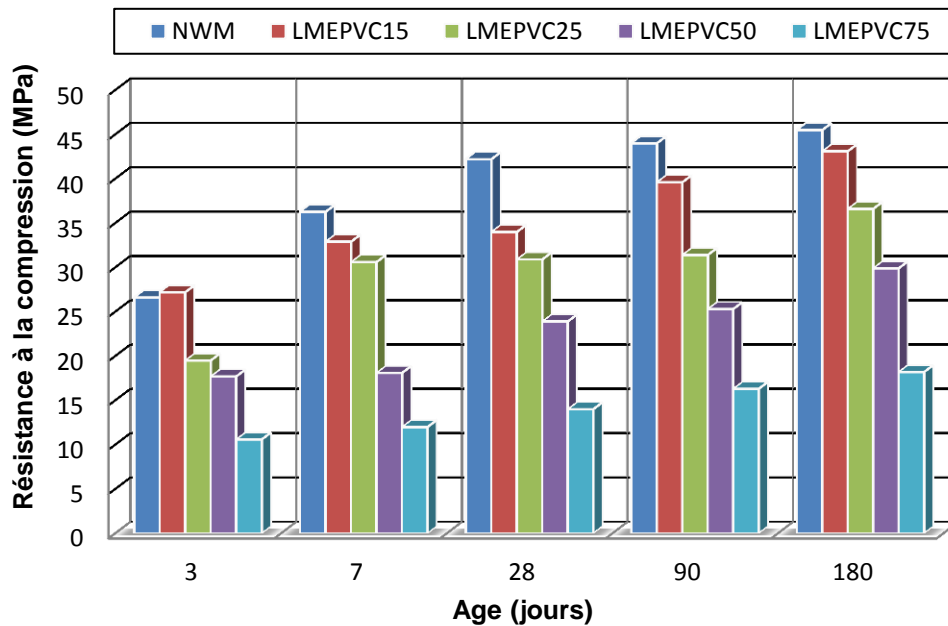
Rai et al. [2] ont signalé que l'augmentation du taux de déchets plastiques dans le béton diminue les densités à l'état frais et sec.

#### **III.4. Caractéristiques mécaniques des mortiers LMEPVC**

La résistance mécanique est exprimée par le pouvoir du mortier à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à différentes charges de compression ou de traction par flexion. Chaque valeur de la résistance à la traction ou à la compression est égale à la moyenne des mesures sur trois éprouvettes.

##### **III.4.1. Résistance à la compression**

La figure III.3 exhibe la variation de la résistance à la compression par rapport à la teneur en particules d'EPVC à 3, 7, 28, 90 et 180 jours.



**Figure III.3 :** Variation de la résistance à la compression des mortiers légers LMEPVC.

Au-delà du 7<sup>ème</sup> jour, la figure III.3 montre que les composites à base de granulats EPVC ont une résistance à la compression inférieure à celle du NWM. On observe également que la résistance en compression de tous les composites LMEPVC augmente avec l'âge de conservation.

Avec l'augmentation de l'âge de 28 à 180 jours, le taux d'augmentation de la résistance à la compression du LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75 était de 27, 18, 25 et 29% respectivement par rapport au NWM.

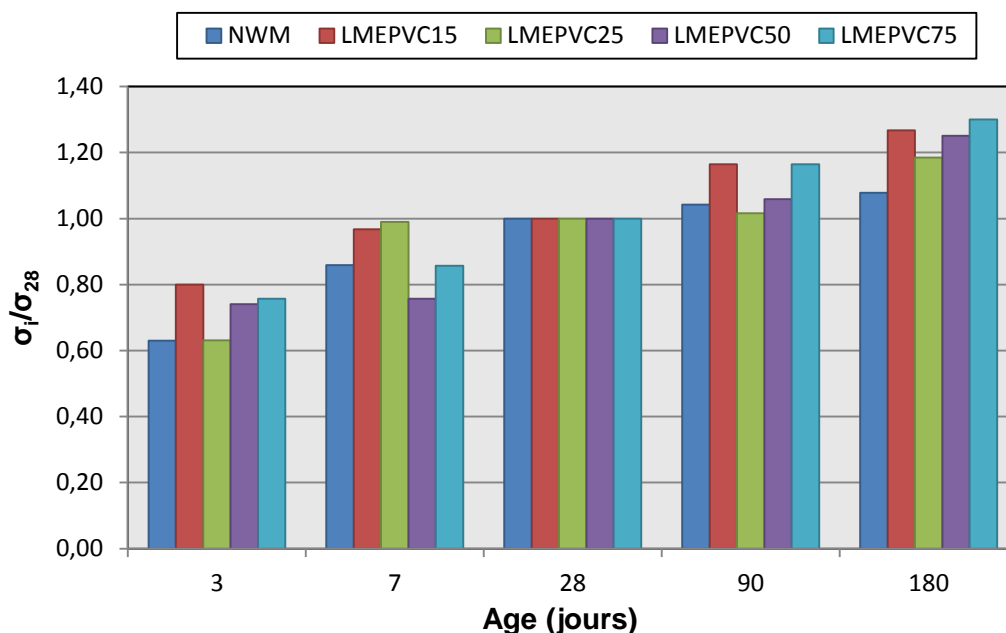
La résistance à la compression a diminué avec l'augmentation de la teneur en déchets en EPVC et ceci est dû, probablement, à la faible liaison entre l'agrégat d'EPVC et la pâte de ciment.

Des résultats similaires ont été rapportés sur les mortiers composites à base des agrégats légers recyclés par Herki et al. [8], Corinaldesi et al. [4], Raut et al. [9], Hannawi et al. [10], et Dulsang et al. [11].

Hannawi et al. [10] ont rapporté que les résistances à la compression à 28 jours des mortiers composites contenant des agrégats en PET et le polycarbonate (PC) préparés par le remplacement de 3%, 10%, 20% et 50% de sable, diminuent lorsque la teneur des agrégats en plastique dans le mortier augmente. Ils ont également constatés une diminution de 69% pour les mélanges avec 50% de granulats en PET et de 63.9% pour les mélanges avec 50% de granulats de polycarbonate (PC).



Pour mieux visualiser toutes les variations de la vitesse d'évolution des résistances en compression ; on présente sur la figure III.4 la variation de la résistance à la compression par rapport à celle mesurée à 28 jours.



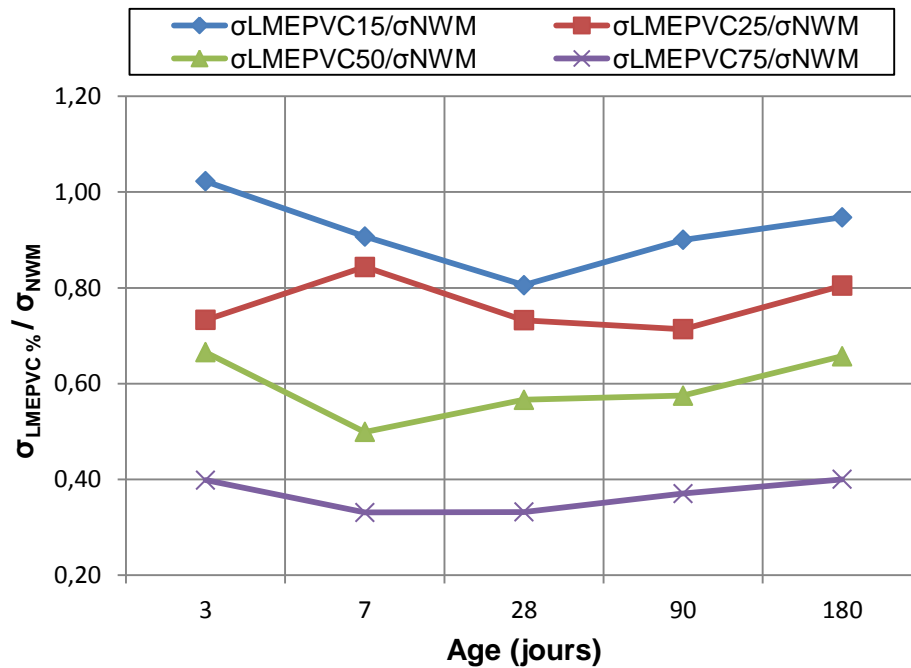
**Figure III.4 :** Evolution du rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (i varie de 3 à 180j).

La vitesse d'évolution des résistances en compression est semblable pour les cinq mortiers. Nous constatons que les résistances se développent rapidement entre 3 et 28 jours, mais au-delà de cet âge, la vitesse d'évolution des résistances est légèrement diminuée pour se stabiliser au cours du temps (vers six mois).

Pour des durées de 3 jours, 7 jours, on observe une évolution comprise entre 76 et 80%, et entre 86% et 97%, respectivement.

Après 28 jours, l'évolution dépend des pourcentages des agrégats d'EPVC ; le composite LMEPVC75 améliore les résistances en compression à long terme (180 jours) de l'ordre de 30%. Pour les composites LMEPVC50 il atteint les 25% en résistances, sauf pour le mortier témoin NWM qui atteint les 8% de sa résistance à 28 jours.

Pour suivre la cinétique de la variation des résistances par rapport au mortier témoin NWM ; on présente sur la figure III.5 la variation de la résistance des composites LMEPVC par rapport au mortier témoin NWM. Ce rapport permettra de connaître la perte ou le gain de résistance par rapport au mortier témoin.



**Figure III.5 :** Evolution du rapport de la résistance à la compression des composites LMEPVC sur la résistance à la compression du mortier témoin NWM en fonction du temps.

Pour l'analyse des courbes de la figure III.5, on peut constater généralement que tous les points expérimentaux des rapports  $\sigma_{\text{LMEPVC}}\% / \sigma_{\text{NWM}}$  se placent au-dessous de 1%. Ceci révèle des pertes de résistance mécanique avec l'augmentation de la durée de conservation des composites par rapport au mortier témoin.

- Á 3 jours, la perte de résistance varie de 28% pour le composite LMEPVC25 et 60% pour le composite LMEPVC75.

- Á 7 jours, la perte de résistance varie de 10% et 66% pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

- Pour une durée de 28 jours, la perte de résistance passe de 20% à 68% pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

- De 90 jours à 180 jours, la perte de résistance prend des valeurs stables et varie de de 10% à 60% pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

Parmi les différents domaines d'utilisation de ces mortiers composites LMEPVC c'est les matériaux de construction qui concernent les travaux de second d'œuvre (mortier de réparation).

### III.4.2. Résistance à la flexion

On a mesuré la résistance à la traction des mortiers par l'essai de flexion trois points. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Chaque valeur retenue représente la moyenne de trois mesures relatives à trois échantillons.

Les résultats de la résistance à la flexion des composites LMEPVCs à l'âge de 3, 7, 28, 90 et 180 jours sont présentés dans la figure III.6.

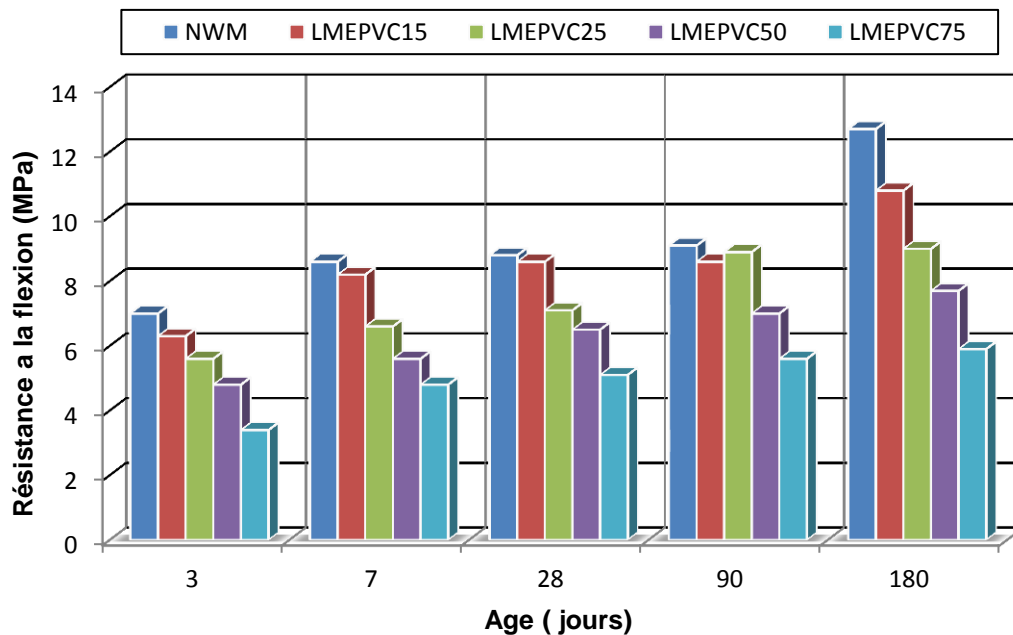


Figure III.6 : Variation de la résistance à la flexion des mortiers légers LMEPVCs.

On remarque, aussi, comme dans la résistance à la compression une augmentation des résistances à la flexion de tous les mortiers avec l'âge de la conservation des éprouvettes. On observe aussi que les composites LMEPVCs exhibent une résistance à la flexion inférieure à celle du mortier témoin NWM à tous les âges.

Généralement la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage des agrégats EPVC dans les composites tels que :

A 3 jours, elle passe de 6.3 à 3.4 MPa pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

A 7 jours, elle passe de 8.2 à 4.8 MPa pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

A 28 jours, elle est de 8.6 à 5.1 MPa pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

À partir de 90 jours, un écart de 3 à 7 MPa entre le mortier témoin et le composite LMEPVC75. La même évolution est observée pour tous ces mortiers. Néanmoins, plus la teneur en EPVC augmente et plus la résistance à la traction par flexion diminue.

Le mortier LMEPVC75 a une résistance à la traction la plus faible comparé aux autres mortiers en raison de la plus grande teneur en EPVC.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par certains auteurs concernant les mortiers à base de granulats légers [4, 10].

Un travail important [10,12] a été fait sur l'utilisation de différents types des déchets plastiques comme agrégats dans les mortiers ou bétons ou comme remplacement partielle par rapport à la masse des mortiers ou bétons. Les résultats de ces études ont montré que les déchets plastiques peuvent être utilisés comme une partie de remplacement des granulats naturels. Quel que soit le type des matières plastiques et le taux de substitution, l'incorporation des granulats en plastique abaisse les diverses propriétés de résistance du béton et du mortier qui en résultent. Ceci est principalement dû à la très faible force de liaison entre les surfaces des particules de matière plastique et de la pâte de ciment. Ce béton ou mortier sont plus ductiles que le béton/mortier classique et ils peuvent (agrégats plastiques) arrêter les fissures générées par les sollicitations mécaniques .

La figure III.7 montre la vitesse de l'évolution de la résistance à la flexion des différents mortiers LMEPVC de notre étude.

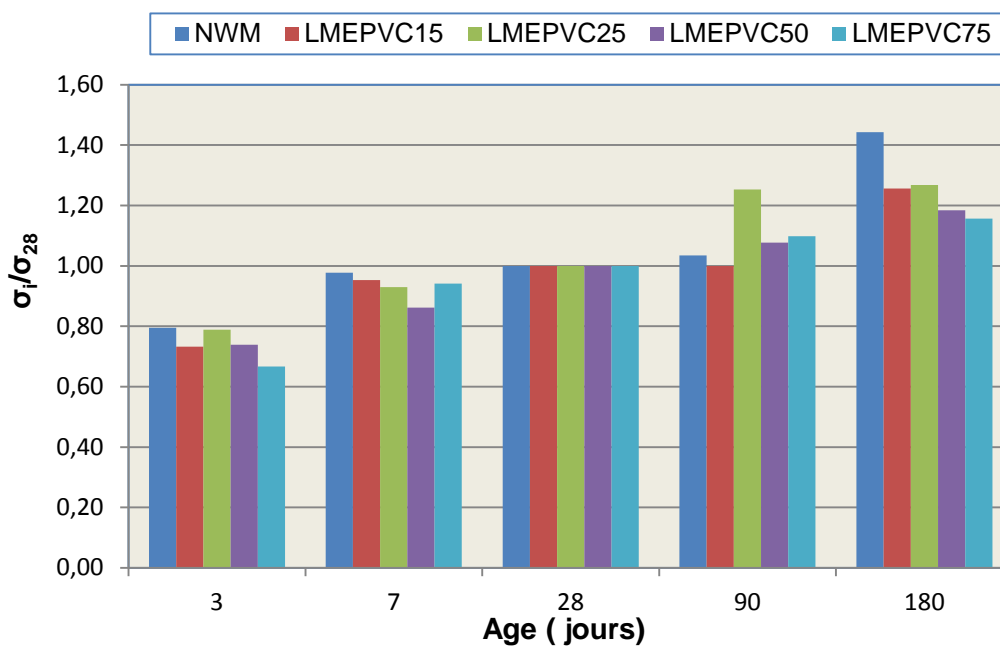
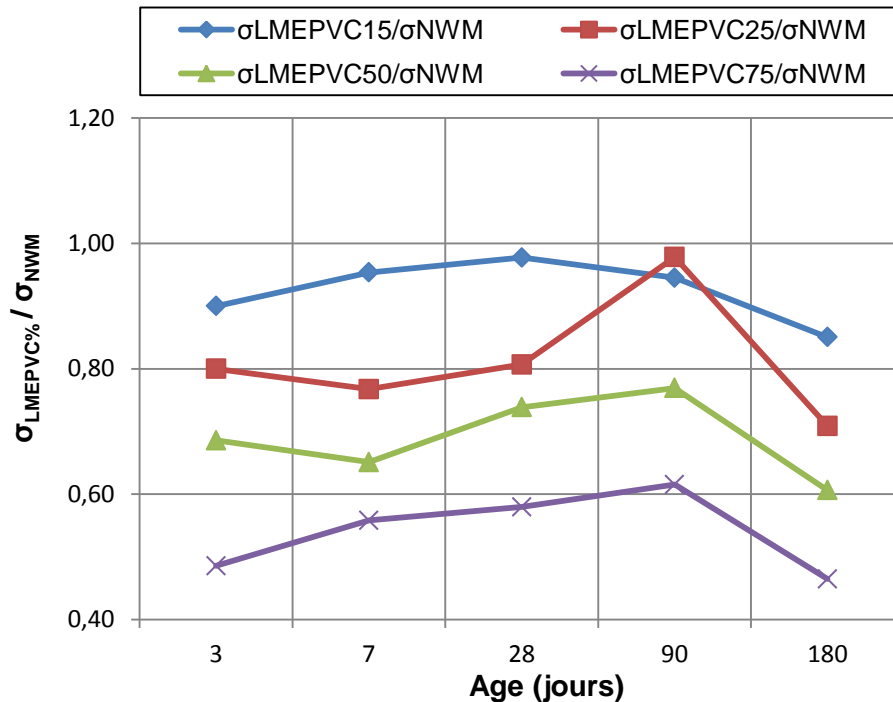


Figure III.7 : Evolution du rapport de la résistance à la flexion des composites par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (i varie de 3 à 180j).

La cinétique des résistances à la traction par flexion suit le même phénomène que celui de la compression. Le mortier témoin NWM à une cinétique qui évolue progressivement passant de 80 % à 3 jours à 144 % à 180 jours. La cinétique des mortiers composites augmente avec l'âge des éprouvettes soit 73% et 67 % à 3 jours de conservation pour les mortiers LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

L'évolution du rapport de la résistance à la traction par flexion par rapport au mortier témoin est représentée par la figure III.8.



**Figure III.8 :** Evolution du rapport de la résistance à la flexion des mortiers légers LMEPVC sur la résistance à la flexion du mortier témoin NWM en fonction du temps.

Pour l'analyse des courbes de la figure III.8, on peut constater que tous les points expérimentaux des rapports  $\sigma_{\text{LMEPVC}} / \sigma_{\text{NWM}}$  se placent au-dessous de 1%. Ceci révèle des pertes de la résistance à la flexion avec l'augmentation de la durée de la conservation des composites par rapport au mortier témoin.

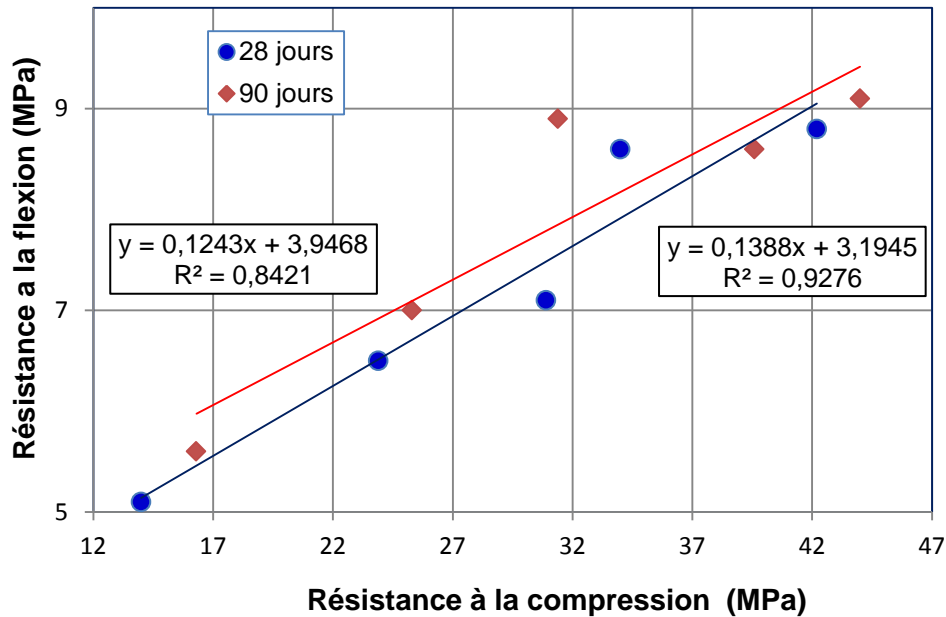
- À 3 jours, la perte de la résistance varie de 10% pour le composite LMEPVC15 et 50% pour le composite LMEPVC75.

- À 7 jours, la perte de la résistance varie de 5% et de 46% pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

- Pour une durée de 28 jours, la perte de résistance passe de 15% à 55% pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement.

D'autre part, la comparaison des résultats d'essais avec celles obtenus par d'autres équipes de recherche reste difficile. Ceci est dû aux différences dans les matières premières utilisées (ciment, agrégats et agrégats de substitution), les proportions de mélange, mode de cure, la préparation des éprouvettes et les méthodes d'essais.

La figure III.9 représente la corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion à 28 et 90 jours des mortiers légers LMEPVC.

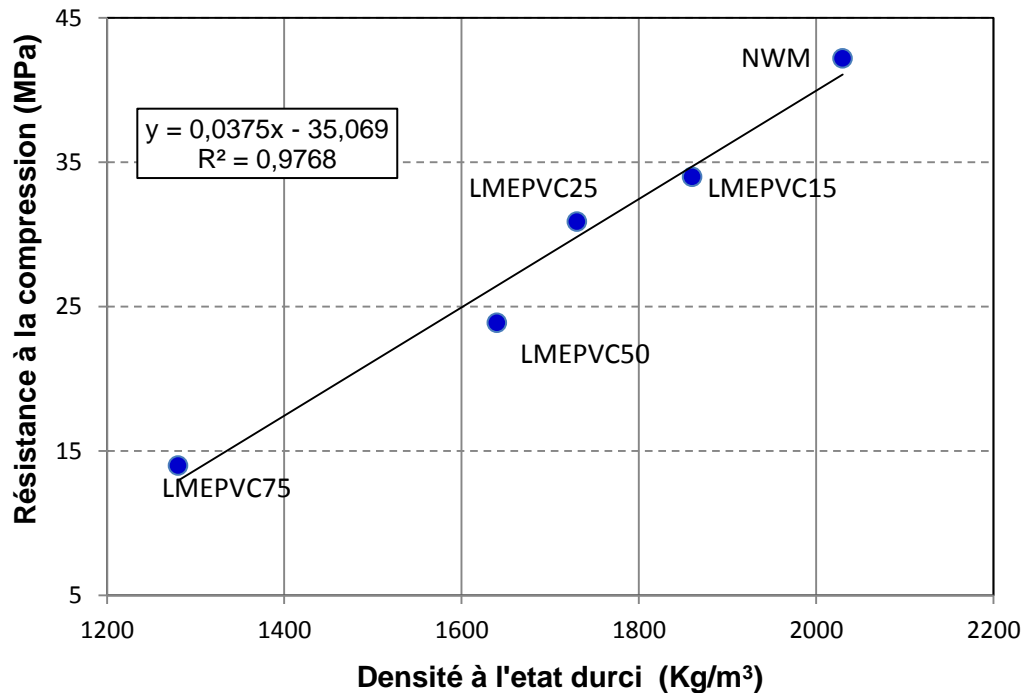


**Figure III.9 :** Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion des mortiers légers LMEPVCs.

La résistance à la flexion et à la compression est fortement corrélée par une relation linéaire montrée sur la figure III.9. Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par Coppola et al. [13] et Sadrumontazi et al. [14].

La relation correspondante entre la résistance à la compression et la densité à l'état durci des mortiers composites est représentée par la figure III.10.





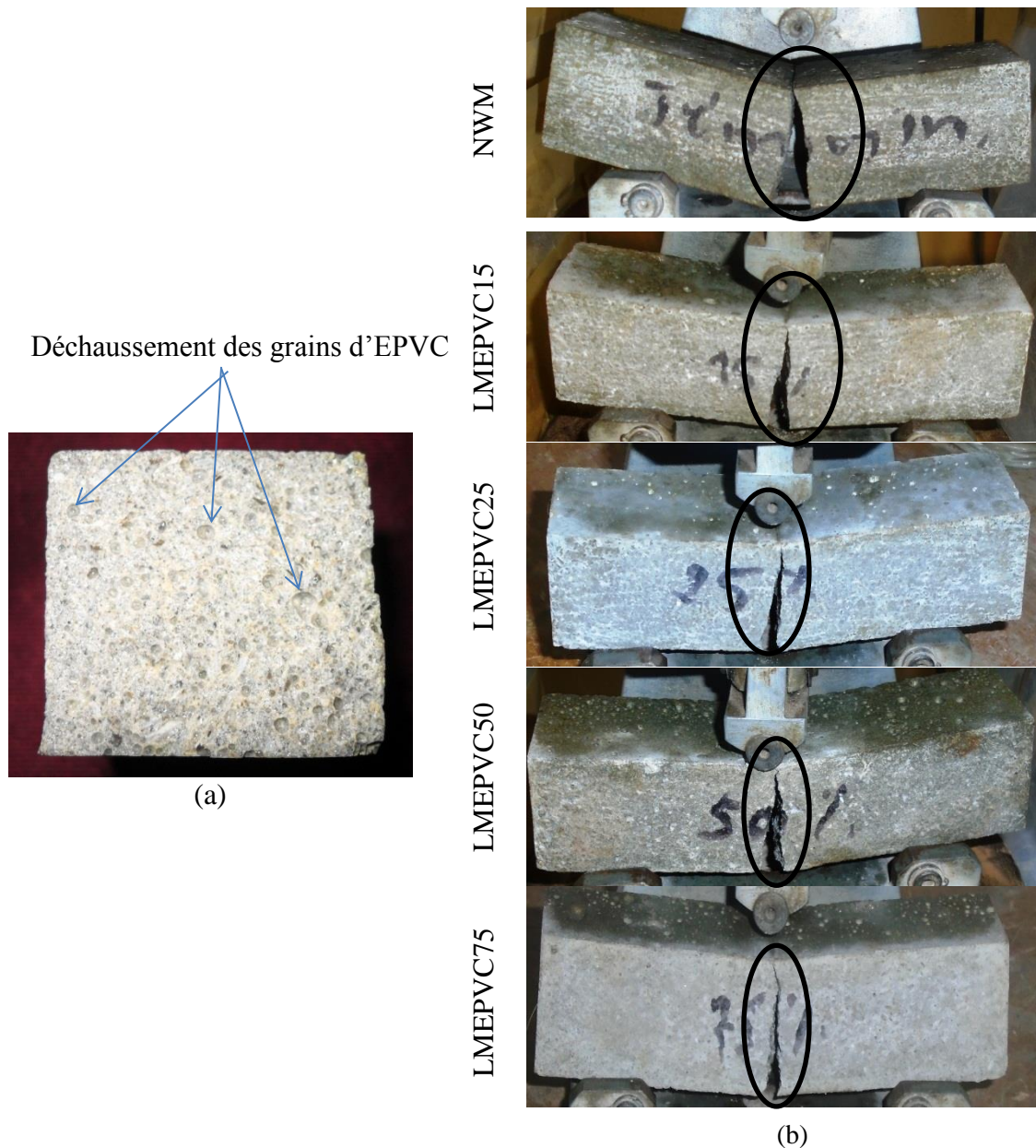
**Figure III.10 :** Corrélation entre la résistance à la compression et la densité à l'état durci après 28 jours.

D'après la figure III.10, la résistance à la compression  $R_c$  varie en fonction de la masse volumique du matériau  $\rho_d$  selon l'expression suivante :  $R_c = 0,0375\rho_d - 35,069$ , avec un coefficient de corrélation de  $R^2 = 0,97$ .

Cette valeur du coefficient de la corrélation indique que la résistance à la compression a une forte relation avec la densité des composites LMEPVCs. Malgré une baisse significative de la résistance à la compression avec l'augmentation de l'inclusion du déchet d'EPVC dans le composite, on a eu une amélioration de la qualité du composite en terme de densité (mortier léger).

### III.4.3. Etat des éprouvettes après l'essai de résistance à la flexion

La figure III.11 montre l'état des échantillons des composites LMEPVCs après l'essai de la résistance à la flexion à 28 jours.



**Figure III.11 :** Etat des mortiers composites légers après l'essai de flexion à 28 jours.

Sur la base de l'analyse de la surface de la rupture d'un mortier à base de granulat EPVC, figure III.11a., on observe un déchaussement des grains d'EPVC sur cette surface. Les photos présentées sur la figure III.11b ont révélées une caractéristique de ductilité du mortier incorporant des granulats EPVC. Ce comportement est similaire à celui observé par Hannawi et al. [10], qui signalent que le béton contenant des agrégats de PET en plastique est plus ductile. Cette ductilité permet d'augmenter la durée de la résistance de l'ouvrage avant l'effondrement.

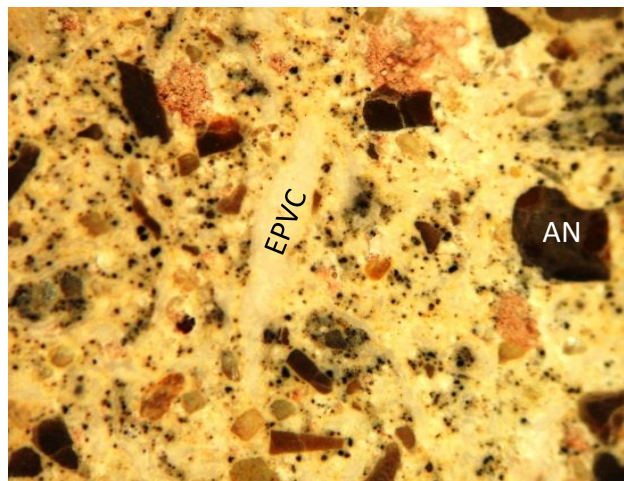
La fissuration s'arrête au niveau des granulats EPVC sans qu'il y'ait rupture de ces derniers. Cela, peut être expliqué du point de vue de la texture des granulats EPVC qui sont ductile et se déforment quand la contrainte devient très importante. Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par Saikia et al. [12], Azhdarpour et al. [15], Herki et al. [8] et Alqahtani et al. [20]; qui ont constaté que l'intervalle de la propagation des fissures a été prolongée en raison de la présence des particules de plastique recyclé.

### **III.5. Caractérisation microstructurale des mortiers légers à l'état durci**

Afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitables, il a été nécessaire de réaliser des essais d'identification microstructurale. Dans ce but, on a fait appel au microscope optique MOP, la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction aux rayons X (DRX) et la spectrométrie IRTF.

#### **III.5.1. Microscopie optique (MOP)**

Les échantillons sont analysés par un microscope optique, disponible au Laboratoire de Biologie Botanique de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.



**Figure III.12 :** Images obtenues au microscope optique MOP sur la fracture des échantillons d'un mortier composite LMEPVC75 (25X) ;  
EPVC: PVC expansé, NA : agrégat naturel,

Le microscope optique utilise des lentilles convergentes pour obtenir une image agrandie de l'échantillon à observer. L'image a été prise sur des échantillons de mortier contenant 75% de PVC expansé (Figure III.12.). La photo MOP obtenue, montre bien la forme et la surface de contact entre la matrice cimentaire, les agrégats naturels et les agrégats d'EPVC.

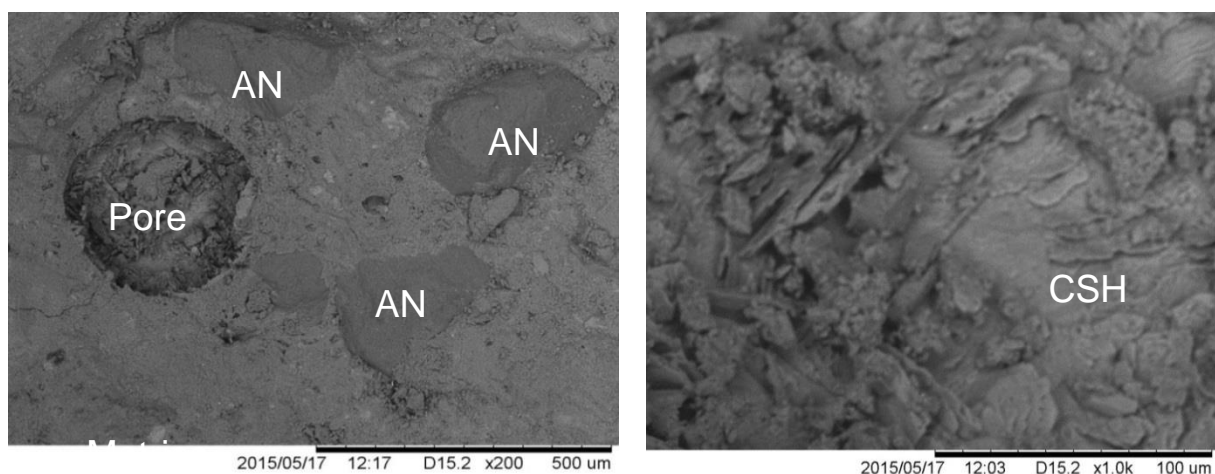
Pour mieux visualiser l'interface de contact entre l'agrégat d'EPVC et la matrice cimentaire, et bien observer la modification microstructurale qui a été engendrée par la présence des agrégats légers EPVC, il faut prendre des images approfondies par un microscope électronique à balayage (MEB).

### III.5.2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Les échantillons sont analysés par un microscope électronique à balayage, type HITACHI TM-1000, disponible à l'Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen), Laboratoire des propriétés de la matière condensée. Le MEB est efficace pour l'observation de la microstructure de la surface avec électron retour diffracté et électron secondaire engendré par l'échantillon.

L'objectif de cette analyse est de visualiser les détails de la microstructure, tels que la morphologie des phases hydratées (silicates de calcium hydratés CSH, portlandite, ettringite, etc.). Ensuite, de découvrir comment s'adhèrent les agrégats légers d'EPVC au sein de la matrice des mortiers composites LMEPVC (agencement ITZ entre la matrice cimentaire et les agrégats d'EPVC).

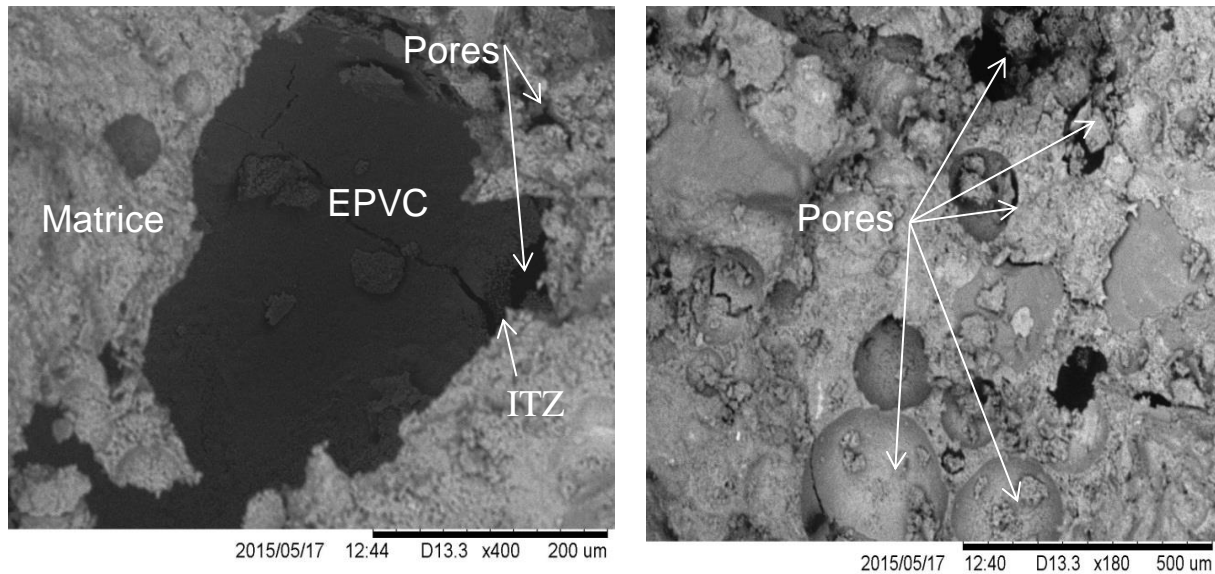
Des images au MEB ont été prises pour les échantillons de mortiers témoin NWM et de mortier composite LMEPVC75 à la même échéance (28 jours) représentées par les figures III.13 et III.14, respectivement. Les photos MEB montrent l'agencement des granulats EPVC au sein du liant cimentaire du composite LMEPVC75 ainsi que la présence des hydrates du silicate de calcium C-S-H et d'autres phases d'hydratation. Ils montrent, aussi, l'aspect microstructural d'agrégat d'EPVC utilisé dans la formulation des composites. L'ajout d'EPVC ne modifie en aucun cas la microstructure du mortier par la formation de produits nouveaux. Il s'agit d'un agencement de la phase EPVC–matrice cimentaire.



**Figure III.13 :** Observation au MEB du mortier témoin NWM.

-CSH : silicates de calcium hydraté, AN : agrégat naturel.





**Figure III.14 :** Observation au MEB d'un mortier composite LMEPVC75.

ITZ: zone de la transition interfaciale, EPVC: agrégats en PVC expansé.

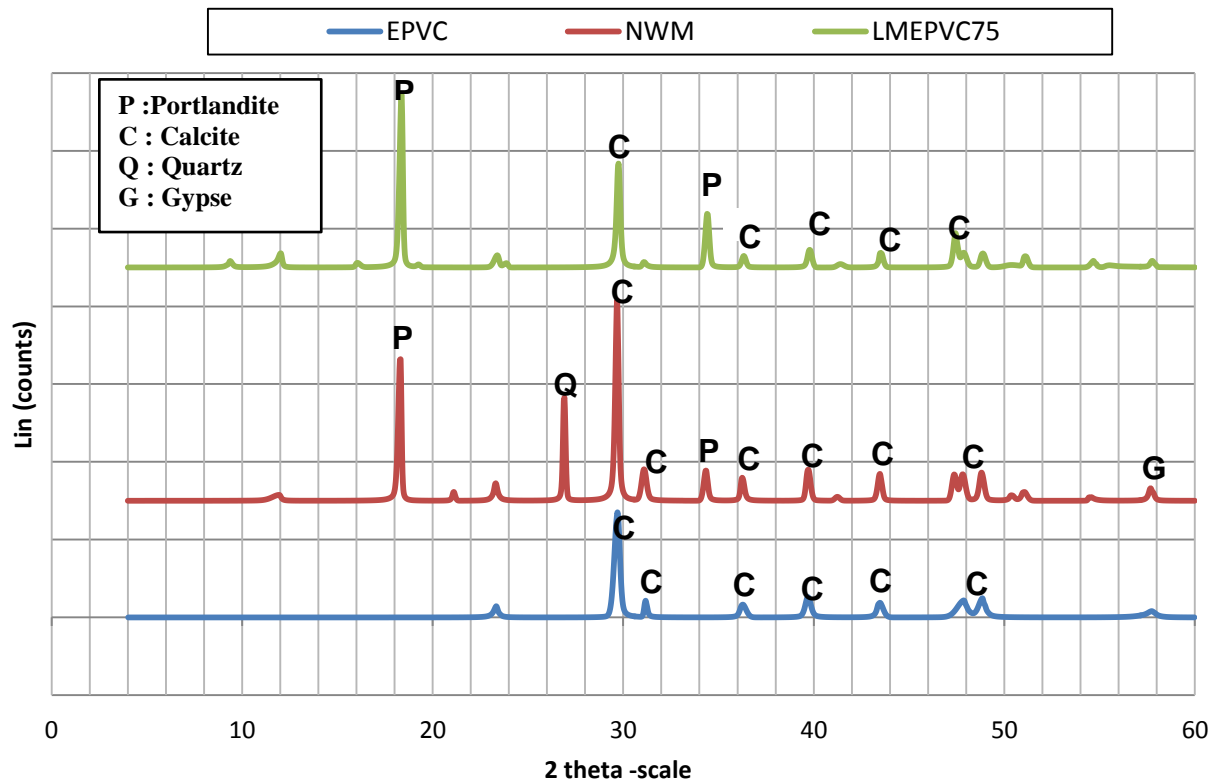
On observe que la qualité de la zone de transition interfaciale (ITZ) entre l'agrégat de EPVC et la pâte de ciment semble assez faible par rapport à l'ITZ entre la matrice cimentaire et l'agrégat naturel (figure III.14). L'analyse MEB a mis en évidence une faible adhérence entre la matrice cimentaire et les agrégats d'EPVC par rapport à l'adhérence entre la matrice de ciment et les agrégats naturels. En outre, des pores plus importants ont été générés dans la matrice cimentaire des composites lors de l'ajout des agrégats d'EPVC. Ceci est un facteur supplémentaire contribuant à la diminution de la résistance à la compression et l'allègement des mortiers composites. Des observations similaires ont été faites par Alqahtani et al. [16], Marzouk et al. [17], Şimşek et al. [18] et Badache et al. [19]. Ils ont associé la diminution des qualités mécaniques avec la mauvaise adhérence entre le granulat recyclé et la matrice de ciment.

### III.5.3. Diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par DRX a été utilisée pour suivre l'évolution du durcissement des différents mortiers et pour mieux étudier l'effet d'introduction d'EPVC sur la structure minéralogique des pâtes durcies. Les analyses sont réalisées sur des échantillons réduits en poudre et passés au tamis de 80 $\mu$ m et à l'échéance de 180 jours.

Les échantillons sont analysés par un diffractomètre Rigaku, MiniFlex 600, utilisant une anticathode de cuivre (Cu-K $\alpha$ ) de longueur d'onde  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ , disponible à l'Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen), Laboratoire de Catalyse et Synthèse en Chimie Organique.

Les analyses par diffraction X portent uniquement sur les phases cristallines des mortiers légers LMEPVC. Les résultats obtenus sont exhibés dans la figure III.15.



**Figure III.15** : Superposition des spectres DRX du mortier témoin NWM, le mortier léger LMEPVC75 et l'agrégat d'EPVC.

L'analyse comparative des spectres DRX obtenus pour le mortier témoin NWM, mortier léger LMEPVC75 et l'agrégat EPVC aux mêmes échéances n'indique pas qu'il y ait des différences significatives sur la nature des espèces cristallines qui composent le liant des matériaux. On trouve, systématiquement, presque les mêmes pics de diffractions, à toutes les teneurs.

Tous les spectres (figure II.15) obtenus révèlent la présence des espèces suivantes :

- Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ;
- L'ettringite  $\text{Ca}_6\text{A}_{12}(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$  ;
- Calcite  $\text{CaCO}_3$ .
- Gypse  $\text{CaSO}_4$ .

La portlandite est caractérisée par un fort signal détecté à l'angle de  $18,09^\circ 2\theta$  correspondant à la raie principale, et deux autres raies secondaires moins importantes sont

détectées aux angles de  $34,09^\circ$  et  $47,12^\circ 2\theta$ . L'hydratation du ciment continue, avec la présence des phases minéralogiques suivantes :

- Le pic le plus intense : la calcite  $\text{CaCO}_3$  avec son pic majeur de  $29,41^\circ 2\theta$ . Ce qui caractérise l'incorporation de l'agrégat EPVC.

- On attribue le pic vers  $23,02^\circ 2\theta$  à la formation de gypse.

- Le quartz se caractérise par le pic majeur à  $26,6^\circ 2\theta$ .

L'analyse quantitative d'une même masse de poudre à partir de ces spectres semble très délicate, car la présence en quantité variable de l'agrégat EPVC modifie la fraction massique des espèces cristallines dans chacun des échantillons. De plus, le tamisage modifie également les proportions entre les constituants.

Il y a réarrangement de la structure cristalline qui a lieu lors de l'hydratation du ciment car les bandes d'absorption caractéristique du clinker anhydre sont remplacé par celui des produits d'hydratation.

Le DRX a révélé que la composition des matériaux cimentaires est qualitativement identique et qu'aucune interaction chimique entre les espèces minérales et l'EPVC n'a pas conduit à une formation de nouveaux composés.

#### **III.5.4. Spectrométrie infrarouge IRTF**

En spectroscopie infrarouge, l'analyse des échantillons est effectuée sur un appareil IRTF de type Agilent Technologies Cary 600 series FTIR Spectrometer (laboratoire LCSCO). Les spectres IRTF ont été obtenus par l'exécution rapide de la technique et du prélèvement en quelques minutes du matériau (Figure III.16). Le tableau III.1 montre bien l'attribution des bandes infrarouges des mortiers composites et les agrégats d'EPVC.



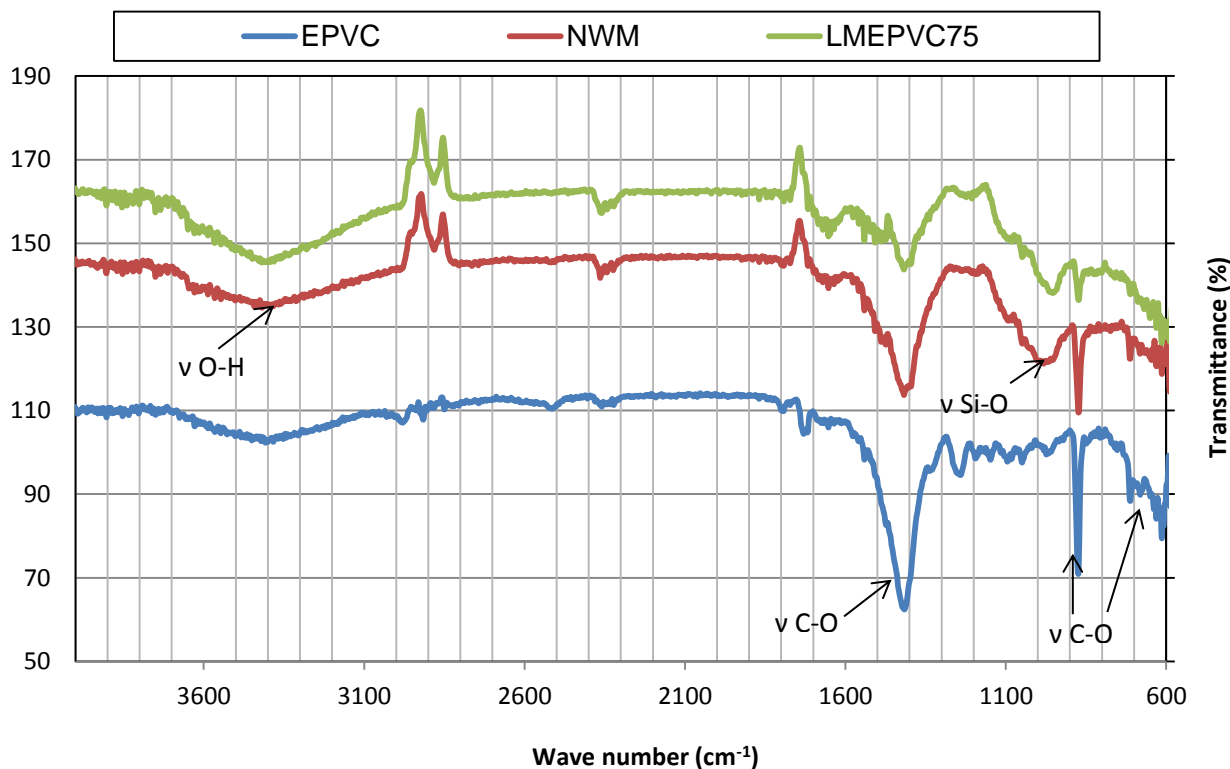


Figure III.16 : Superposition des spectres infrarouges des échantillons NWM, LMEPVC75 et les agrégats d'EPVC.

Tableau III.1 : Attribution des bandes infrarouges des mortiers NWM, LMEPC75 et l'agrégat d'EPVC.

Bands IRTF caractéristiques (cm <sup>-1</sup> )	Groupe chimique	Constituants	NWM	LMEPVC75	EPVC (à base de 21% de la calcite)
3160-3650	H <sub>2</sub> O, OH, liaisons hydrogènes	Gypse, CSH	+	+	/
~ 3648	H <sub>2</sub> O, OH, liaisons hydrogènes	Hydrate hexagonale portlandite	+	+	/
3455-3490	H <sub>2</sub> O, OH	AFm, AFt	+	+	/
1615-1625	H <sub>2</sub> O, v O-H		+	+	/
1418-1428	v C-O	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	++	++	++++
870-873	v C-O	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	++	++	++++
710-713	v C-O	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	++	++	++++
~ 1020-1090	v Si-O	Vibrations des CSH	+	+	/
Bandes d'harmoniques	~2971	v C-O	++	++	++++
	2865-2885	v C-O	++	++	++++
	2511-2520	v C-O	++	++	++++
	~ 1760-1766	v C-O	++	++	++++

/: Absence d'élément ; + : Présence d'élément ; ++ : Présence en quantité importante ; Ft: C(A,F).3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O; AFm: C<sub>3</sub>A.3CaSO<sub>4</sub>.12H<sub>2</sub>O

De même, L'IRTF a révélé que la composition des matériaux cimentaires est qualitativement identique et qu'aucune interaction chimique entre les espèces minérales et l'EPVC n'a pas conduit à une formation de nouveaux composés.

### III.6. Vitesse de propagation des ondes sonores UPV

Les résultats d'essais de l'UPV des composites LMEPVC, à différentes teneurs en particules de l'EPVC, sont donnés par la figure III.17.

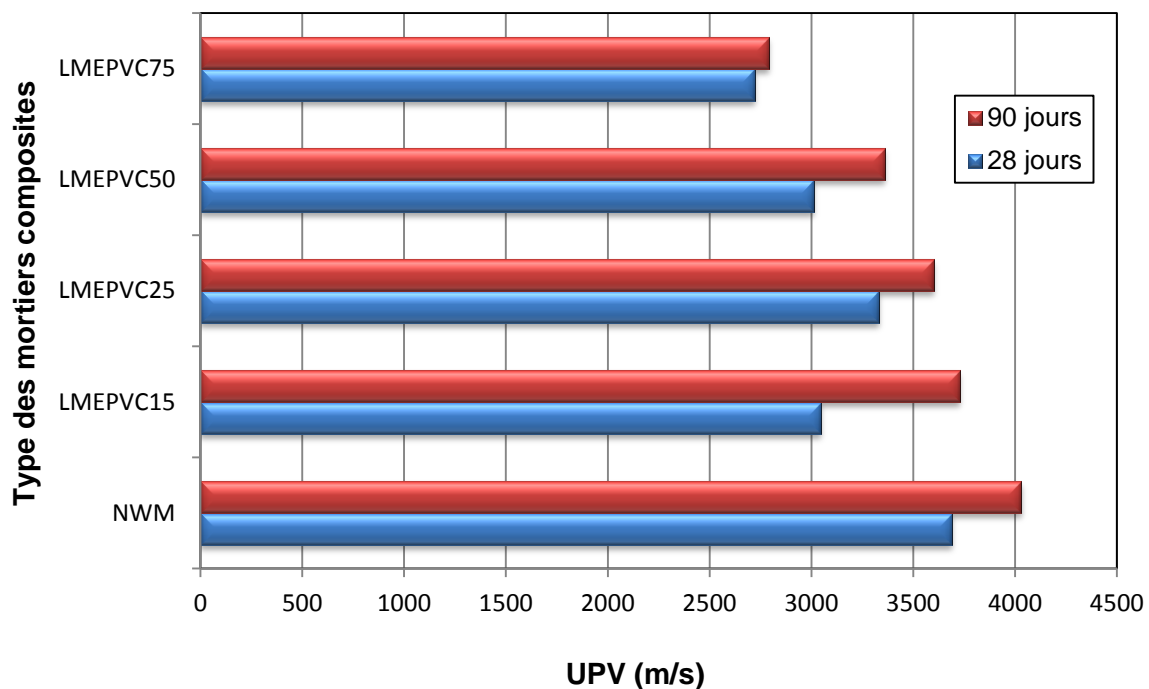


Figure III.17 : L'effet de l'EPVC sur la vitesse de propagation des ondes sonores des composites LMEPVCs à 28 et 90 jours.

On constate que l'UPV diminue à mesure que la proportion des granulats en EPVC augmente dans tous les mélanges, après 28 et 90 jours. Il est également à noter que le pourcentage de la diminution de l'UPV varie de 6 à 7%, de 10 à 11%, de 18 à 17% et de 2 à 30% pour les composites LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75 par rapport au NWM à 28 et 90 jours, respectivement.

L'augmentation des valeurs de l'UPV de 28 à 90 jours peut être attribuée à la formation de produits d'hydratation du ciment qui remplissent les vides de la matrice cimentaire des LMEPVCs.

La substitution du sable par l'EPVC augmente la porosité du mortier composite. Les pores formés par les particules de l'EPVC atténuent l'UPV par l'impédance acoustique.

Lorsque l'onde incidente passe à travers différents matériaux (matrice cimentaire, EPVC, pores), elle est partiellement réfléchiée et une partie est transmise, de sorte que sa vitesse diminue.

Par conséquent, l'incorporation de l'EPVC dans la matrice cimentaire révèle à la fois la capacité des composites à réduire l'intensité sonore et l'amortissement des vibrations, ce qui permet de fournir un niveau de fiabilité de l'isolation acoustique. Les mêmes résultats ont été obtenus pour les mortiers composites à base d'agrégats légers recyclés [8, 14, 15, 19].

Le tableau III.2 présente le classement de la qualité des mortiers composites en fonction de la vitesse d'impulsion des ondes ultrasonores selon la norme IS 13311-1-92 [20]. On peut observer à partir des résultats du tableau III.2 que la qualité en terme de résistance de l'échantillon témoin NWM et des composites LMEPVC15 et LMEPVC25 peuvent être considérés comme bonne en général, mais la qualité des spécimens LMEPVC50 et LMEPVC75 est examinée comme moyenne et assez faible, respectivement, à l'âge de 90 jours.

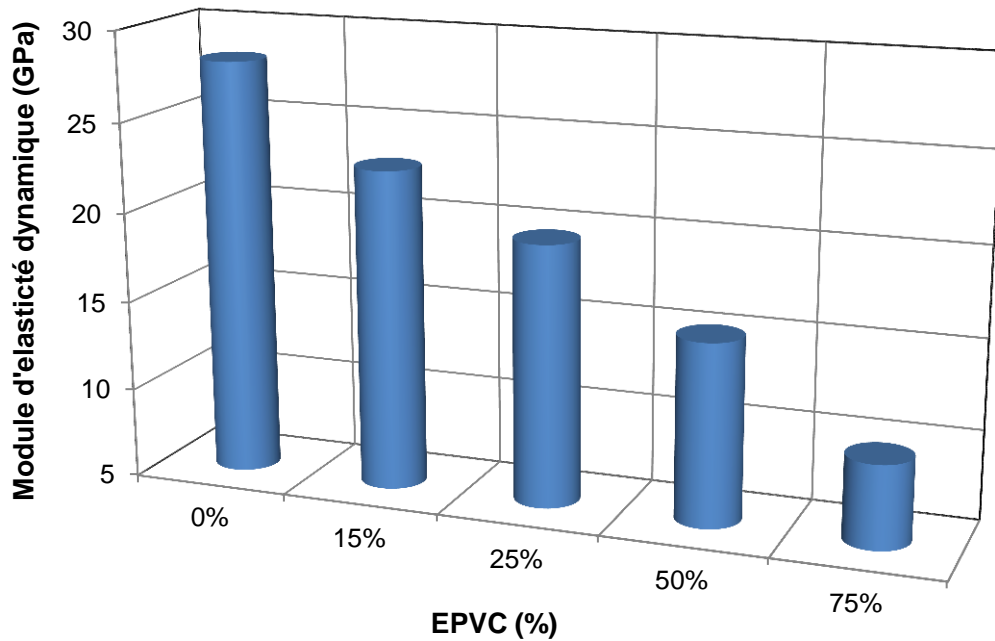
**Tableau III.2 :** La qualité des mortiers composites LMEPVCs suivant l'IS 13311-1-92, à 90 jours.

Mortiers composites	UPV (Km/s) 90 jours	Qualité du mortier composite IS 13311-1-92 [20]
NWM	4.03	Bon
LMEPVC15	3.73	Bon
LMEPVC25	3.60	Bon
LMEPVC50	3.36	Moyen
LMEPVC75	2.79	Mauvais

### III.7. Module d'élasticité dynamique

On a choisi de déterminer le module d'élasticité dynamique par la mesure de l'UPV à l'aide d'un appareil de test ultrasonique – *Pundit lab* selon la norme (ASTM C597-02) [21].

La figure III.18 présente l'évolution du module d'élasticité dynamique des composites LMEPVCs en fonction du pourcentage en EPVC. La figure III.18 montre que le module d'élasticité dynamique diminue lorsque le pourcentage d'EPVC augmente.



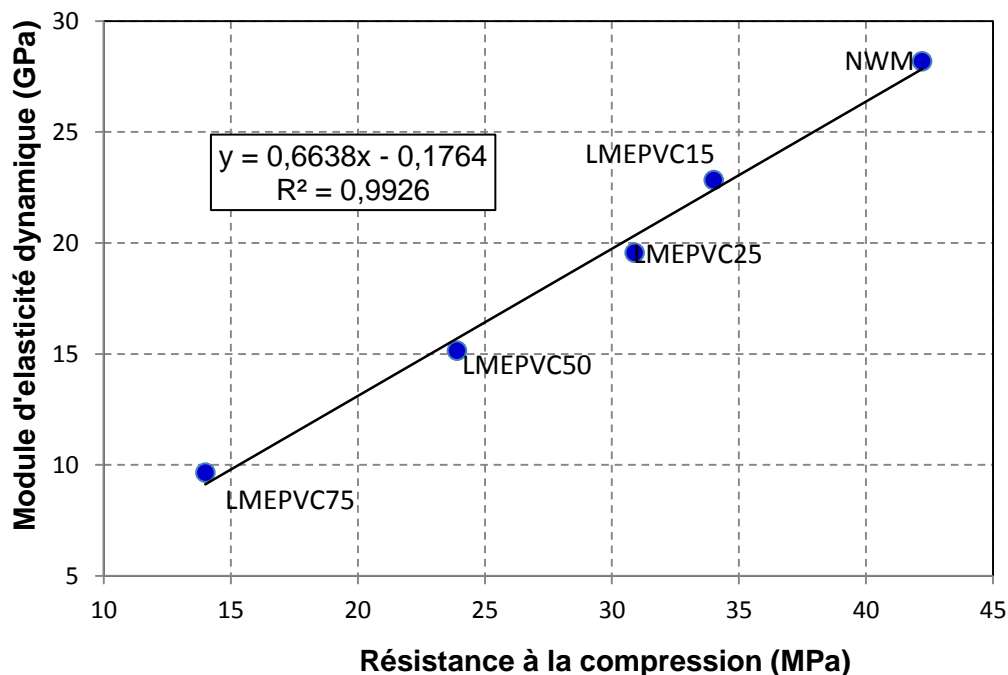
**Figure III.18 :** Evolution du module d'élasticité dynamique des composites LMEPVCs en fonction du pourcentage d'EPVC.

D'après la figure III.18, on constate que la valeur du module d'élasticité varie entre 28,2GPa et 9,7GPa pour les composites NWM et LMEPVC75, respectivement. Le pourcentage de la diminution du module d'élasticité dynamique est d'environ 19, 30, 46 et 66% pour les composites LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75 par rapport au mortier de référence NWM, respectivement.

La faible liaison entre la matrice cimentaire et les agrégats d'EPVC peut également contribuer à cette chute, comme le montre les observations au MEB, figure III.14. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par Hannawi et al. [10], Marzouk et al. [17] et Rahmani al. [22].

Il est à noter, aussi, que la valeur du module d'élasticité dépend du type d'agrégat utilisé, de la résistance à la compression et de la densité du mortier LMEPVC.

La figure III.19 représente la relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression.



**Figure III.19 :** Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression à 28 jours.

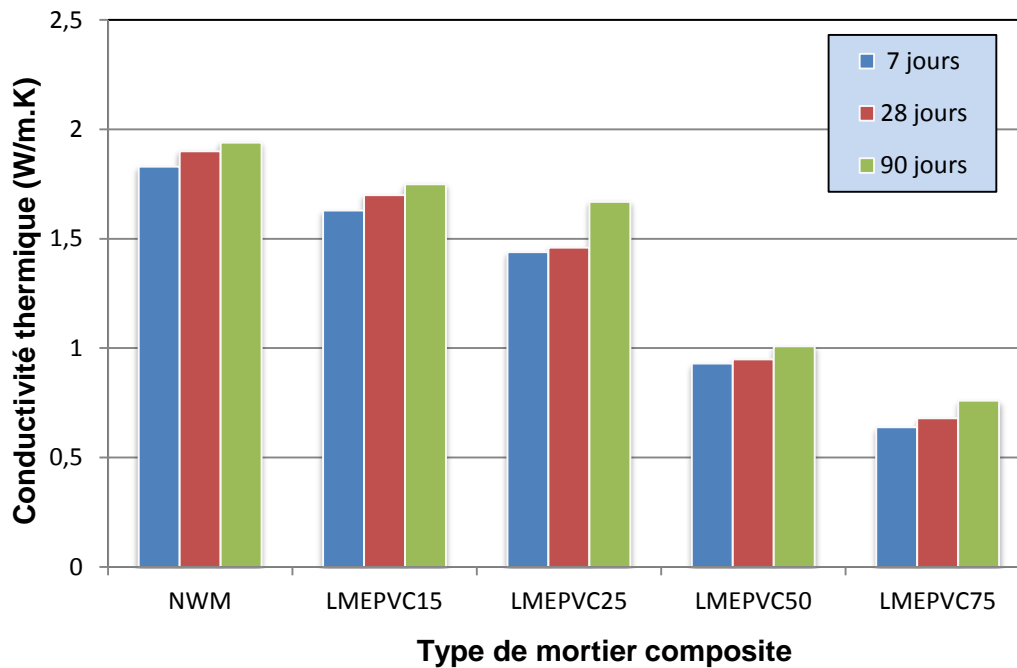
Le module d'élasticité dynamique peut également être lié à la résistance à la compression en utilisant l'équation proposée et représentée sur la figure III.19. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par Hannawi et al. [10], Marzouk et al. [17] et Rahmani et al. [22]. De plus, cette réduction de la résistance du matériau à base d'EPVC peut être considérée comme potentiellement intéressante pour certaines applications telles que les chaussées, où la réduction du module d'élasticité dynamique peut être considérée comme bénéfique.

### III.8. Caractérisation des propriétés thermiques

#### III.8.1. Conductivité thermique ( $\lambda$ )

La conductivité thermique est l'aptitude d'un matériau à conduire de la chaleur. Il s'agit d'une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction.

La figure III.20 exhibe la variation de la conductivité thermique des composites LMEPVCs à 7, 28 et 90 jours.



**Figure III.20 :** Variation de la conductivité thermique des composites LMEPVCs à 7, 28 et 90 jours.

On observe que tous les mortiers composites LMEPVC ont connus une baisse de la conductivité thermique par rapport au NWM à tous les âges.

Soit un écart de 65 % entre le mortier LMEPVC75 et NWM à 7 jours et 11 ; 21 et 49 % par rapport au mortier LMEPVC15, LMEPVC25 et LMEPVC50, respectivement.

A partir de 28 jours, la conductivité des mortiers se stabilisent autour de 0,76 -1,94 W/m. K et ce jusqu'à 90 jours.

La réduction de la conductivité thermique des composites LMEPVCs est due à l'effet isolant des particules de l'EPVC, qui présente une conductivité thermique plus faible (0,081 W/m. K) par rapport à celle de la matrice cimentaire.

Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par Boumhaout et al. [6], Dulsang et al.[11], Gouasmi et al.[23] et Benosman et al. [24]. Ces résultats laissent présager une large gamme d'application de ces composites dans le domaine de l'isolation thermique.

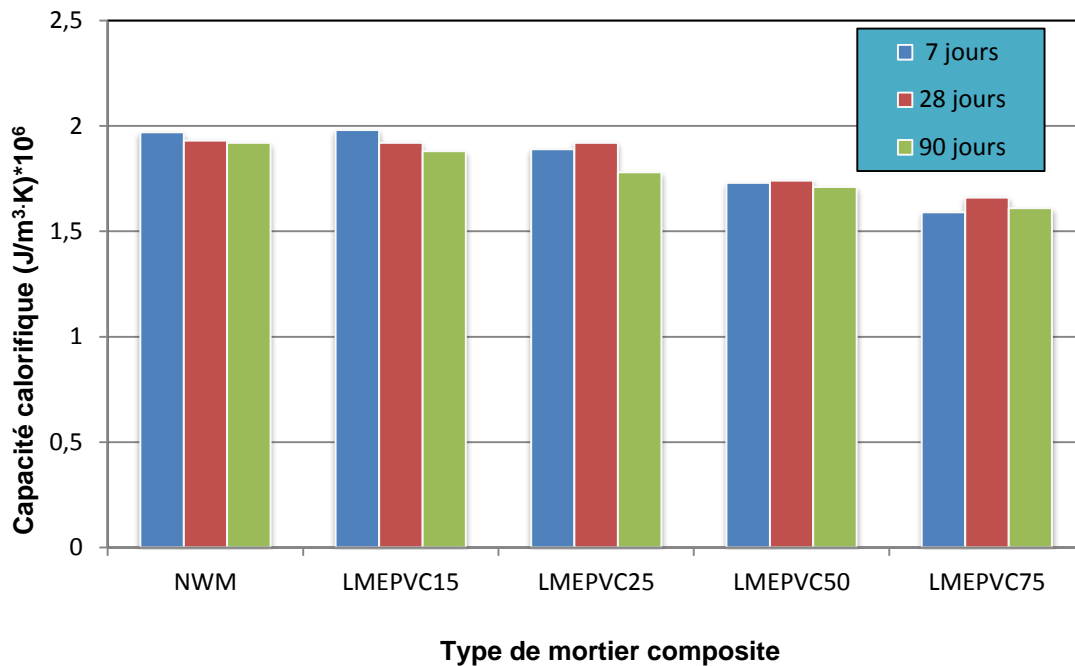
La valeur de la conductivité obtenue pour une composition à 75% en EPVC ( $\lambda=0,76$  W/m.K), reste compatible avec l'utilisation des matériaux dans le domaine d'application des mortiers isolants, selon la classification de la recommandation RILEM LC2 1978[25].



### III.8.2. Capacité calorifique (Cp)

La capacité calorifique est la quantité de la chaleur que peut emmagasiner un matériau par rapport à son volume. Elle est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 m<sup>3</sup> du matériau.

La figure III.21 exhibe la variation de la capacité calorifique des composites LMEPVC à 7, 28 et 90 jours.



**Figure III.21 :** Variation de la capacité calorifique des composites LMEPVCs à 7, 28 et 90 jours.

D’après la figure III.21, on a constaté que tous les mortiers composites LMEPVC ont connus une baisse capacité calorifique par rapport au NWM à tous les âges.

A 7 jours, la capacité calorifique du mortier NWM atteint une valeur moyenne de  $1,97 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup>.K qui est nettement supérieurs à celle des mortiers composites légers LMEPVC.

Le mortier LMEPVC75 a une capacité calorifique moindre par rapport aux autres mortiers avec un écart de 19 % par rapport au mortier NWM à 7 jours.

A 90 jours, on constate que tous les mortiers composites légers LMEPVC ont connus une baisse de la capacité calorifique par rapport au NWM. Pour le LMEPVC15 : 3% de baisse a été enregistrée, 11% pour le LMEPVC50 et finalement 16% pour le LMEPVC75.

À mesure que la proportion en EPVC augmente, on constate une diminution de la conductivité thermique des mortiers composites et comparativement, une faible variation de

leur capacité calorifique. Badache et al. [19] et Mounanga et al. [26] ont constaté le même phénomène avec la mousse de polyuréthane et le polyéthylène à haute densité, respectivement.

### III.8.3. Diffusivité thermique (a)

La diffusivité thermique caractérise l'aptitude d'un matériau à transmettre de la chaleur. Elle exprime la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur du matériau. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique  $\lambda$  et est inversement proportionnelle à la chaleur spécifique C et la masse volumique  $\rho$  selon la relation suivante:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

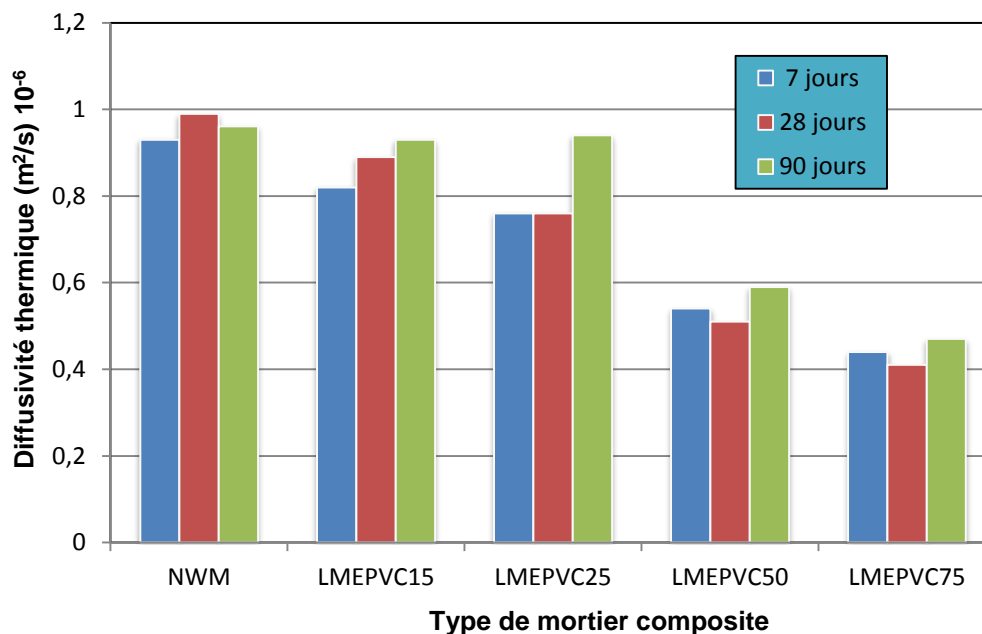
a : diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/s)

$\lambda$ : conductivité thermique (W/m.K)

$\rho$  : masse volumique du matériau (Kg/m<sup>3</sup>)

C : chaleur massique (J/Kg.K)

La figure III.22 exhibe la variation de la diffusivité thermique des composites LMEPVC à 7, 28 et 90 jours.



**Figure III.22 :** Variation de la diffusivité thermique des composites LMEPVCs à 7, 28 et 90 jours.

D’après la figure III.22, on a constaté que tous les mortiers composites LMEPVCs ont connus une baisse de la diffusivité thermique par rapport au NWM à tous les âges.

Le mortier LMEPVC75 à une diffusivité thermique moindre par rapport aux autres mortiers avec un écart de 52, 58, 51% par rapport au mortier NWM à 7, 28 et 90 jours, respectivement.

On pourra conclure que les composites contenant de l’EPVC ont des propriétés d’isolation thermique meilleure que ceux du mortier non modifié. En conséquence, ils pourraient fournir de multiples applications, en particulier pour empêcher le transfert de chaleur et pour économiser de l’énergie au sein d’un bâtiment conçu pour un développement durable.

La relation entre la conductivité thermique et la densité à l’état durci des mortiers composites est représentée par la figures III.23 ; plus la densité du mortier diminue plus sa conductivité thermique diminue.

La relation de la corrélation résultante est de type  $\lambda = 0,1009 e^{0,0015p}$  et son coefficient de corrélation est  $R^2 = 0.9234$ , ce qui mène à dire que c’est une corrélation raisonnable.

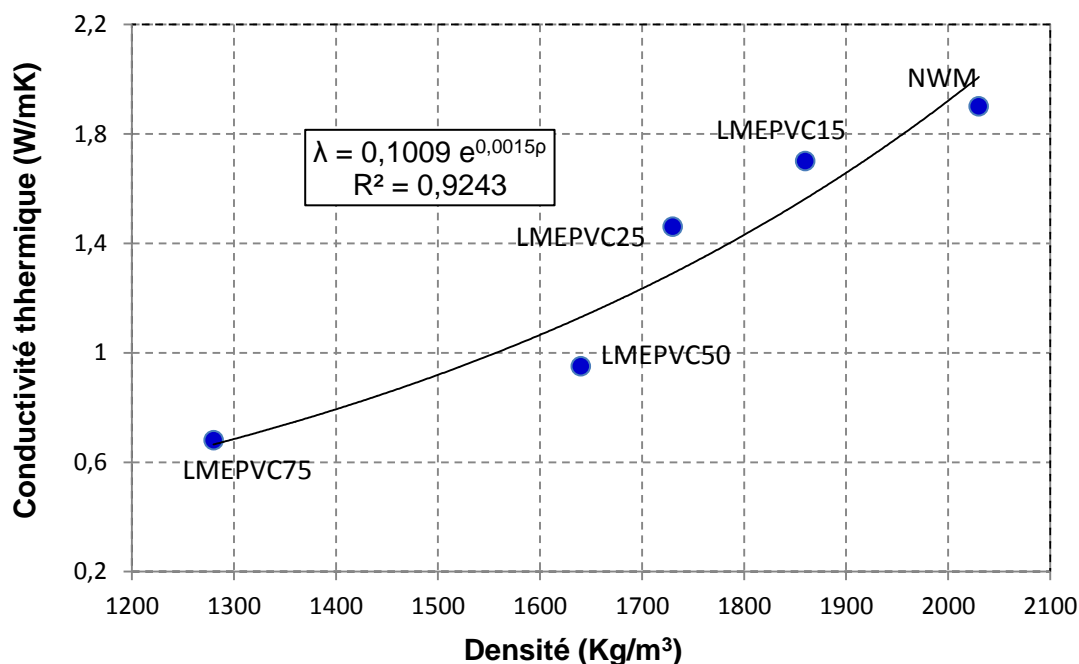


Figure III.23 : Corrélation entre la conductivité thermique et la densité des composites LMEPVC à 28 jours.

La baisse des densités des mortiers composites LMEPVC, par conséquent leurs poids, sont la cause de la légèreté de l’agrégat composite EPVC, plus ses proportions sont importantes plus le mortier composite résultant est léger [35].

L'effet de l'EPVC qui a une conductivité thermique très basse (0,081w/m.k) et sa teneur dans les mortiers composites LMEPVC fait que leurs conductivités respectives baissent.

En outre, la diminution de la conductivité thermique est également liée à la teneur en air dans la matrice cimentaire. Cela peut être dû à la fois à la capacité d'EPVC à repousser l'eau (caractère hydrophobe) et à l'augmentation de l'entraînement d'air, qui se manifeste par des pores fermés vides, qui ne sont pas accessibles à l'eau. Nos résultats concordent avec ceux trouvés par Hannawi et al. [10], Mounanga et al. [26] et Benazzoug et al. [27].

On a voulu exploiter le résultat de la conductivité thermique de nos mortiers après celle de la résistance à la compression à la même échéance représentée par la figure III.24.

La relation entre la conductivité et la compression permet de constater la corrélation existante entre ces deux paramètres. En effet, plus la conductivité est élevée et plus la compression est grande, du fait que les mortiers avec une plus grande conductivité thermique sont moins poreux que ceux ayant une conductivité plus basse.

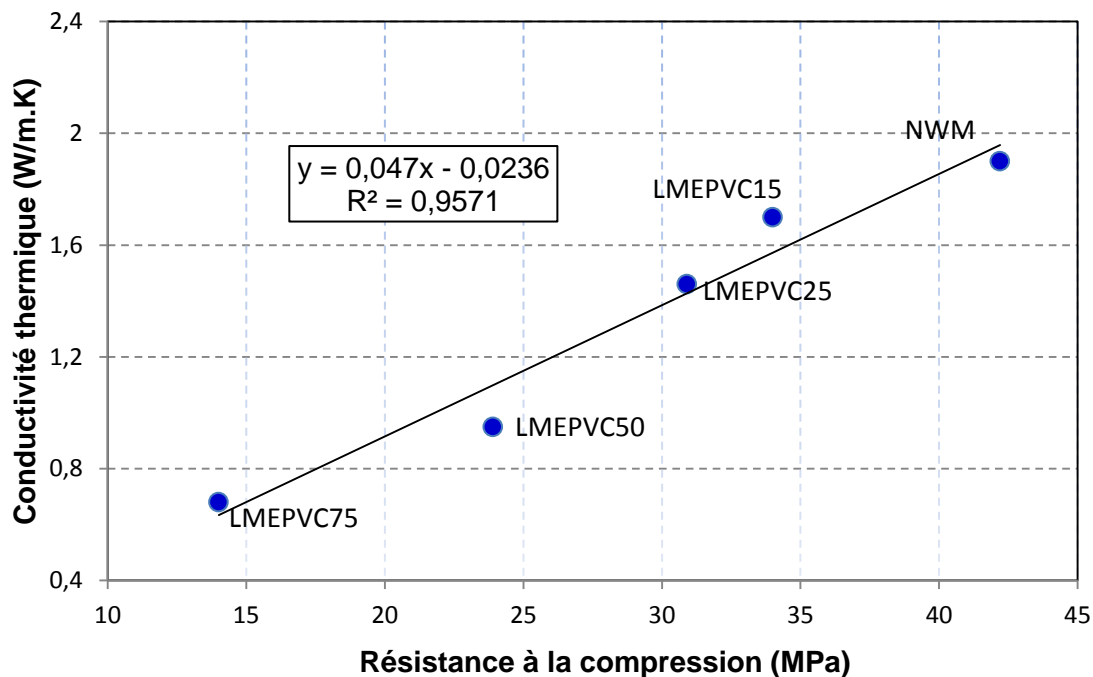


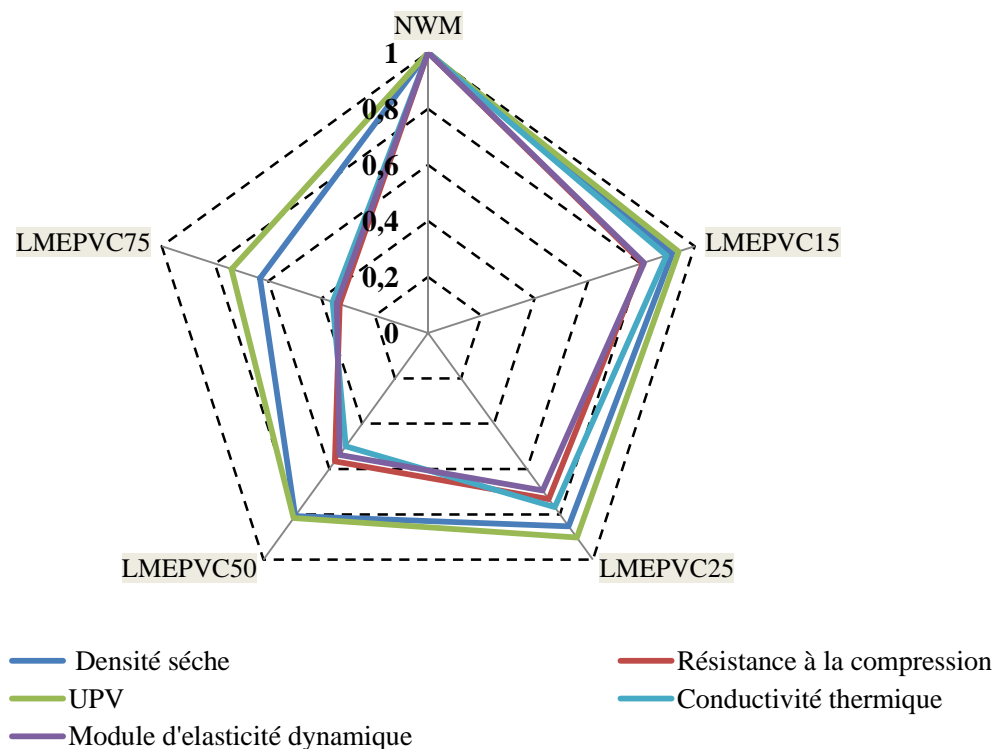
Figure III.24 : Corrélation entre la conductivité thermique et la résistance à la compression des composites LMEPVCs à 28 jours.

La relation correspondante entre la conductivité thermique et la résistance à la compression du mortier composite est représentée par la figure III.24. La conductivité thermique décroît avec la diminution de la résistance à la compression. La corrélation extraite est du type:  $y = 0.047 x - 0,0236$  ( $R^2 = 0,9571$ ). La conductivité thermique des matériaux

dépend de nombreux facteurs, y compris leur structure, leur formulation, le type d'agrégat, la densité et la porosité...etc.

### III.9. Relation entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs

La figure III.25, montre une relation entre l'ensemble des propriétés physiques, mécaniques et thermiques des mortiers composites légers LMEPVC à 28 jours.



**Figure III.25 :** La relation entre les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 28 jours.

L'analyse de la figure III.25 montre une diminution de toutes les propriétés avec l'augmentation de la teneur en agrégats d'EPVC à 28 jours.

Au périphérique du graphe, on observe que les mortiers composites LMEPVC15 et LMEPVC25 montrent des propriétés proches au mortier témoin NWM ; et par contre, si on va aller vers le centre, on note des diminutions considérables pour les paramètres obtenus des mortiers composites légers LMEPVC50 et LMEPVC75. Le composite LMEPVC75 présente les faibles valeurs par rapport aux autres composites.

Les différentes corrélations entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs sont représentées par le tableau III.3.

**Tableau III.3 :** Corrélations entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs.

Paramètres	Equation de corrélation	Coefficient de corrélation
Résistance à la flexion / Résistance à la compression	$y = 0.1388x + 3.1945$	$R^2 = 0.9926$
Résistance à la compression / Porosité accessible à l'eau	$y = -0.2411x + 22.952$	$R^2 = 0.9781$
Resistance a la compression / UPV	$y = 27.669x - 60.758$	$R^2 = 0.9897$
UPV/densité	$y = 1.5703 e^{0.0004x}$	$R^2 = 0.9620$
Module d'élasticité / Résistance en compression	$y = 0.6638x - 0.1764$	$R^2 = 0.9926$
Conductivité thermique / densité	$y = 0.1009 e^{0.0015x}$	$R^2 = 0.9243$
Conductivité thermique / UPV	$y = 1.3269x - 2.9666$	$R^2 = 0.9883$
Conductivité thermique / Porosité accessible à l'eau	$y = 0.047x - 0.0236$	$R^2 = 0.9571$

Les équations représentées dans le tableau III.3 indiquent des valeurs élevées correspondante aux coefficients de corrélation  $R^2$  et ceci montre la forte relation qui existe entre les différents paramètres étudiés pour les mortiers composites à base des agrégats légers d'EPVC "LMEPVCs".

### III.10. Conclusion

Cette étude a permis de mieux comprendre les comportements physiques, mécaniques et thermiques des matériaux composites mortier-polymère LMEPVCs ; tels que :

- L'ajout des agrégats de déchets d'EPVC comme remplacement partiel en volume du sable contribue à réduire le poids spécifique des composites LMEPVCs par rapport au mortier témoin ;
- L'augmentation du pourcentage des granulats EPVC a un effet direct sur la résistance à la compression et à la flexion des composites, plus ce pourcentage augmente, plus ces résistances chutent. Les résultats montrent une ductilité amplifiée par l'augmentation du pourcentage de substitution et une amélioration de l'aspect extérieur ;
- L'incorporation des particules d'EPVC dans la matrice cimentaire révèle la capacité des composites à la fois de réduire l'intensité sonore et d'amortir les

vibrations, ce qui permet de fournir un niveau de fiabilité de l'isolation acoustique ;

- Le module d'élasticité dynamique diminue lorsque le pourcentage d'EPVC augmente. On observe une diminution du module  $E_d$  d'environ 66% pour le composite LMEPVC75 par rapport au mortier de référence NWM ;
- Les particules d'EPVC ont une conductivité thermique significativement plus faible que l'agrégat naturel et la matrice cimentaire utilisé dans la formulation des mortiers. Ceci correspond à une diminution d'environ 60% pour le LMEPVC75 par rapport au mortier témoin NWM ;
- L'analyse MEB a mis en évidence une faible adhérence entre la matrice cimentaire et les agrégats d'EPVC par rapport à l'adhérence entre la matrice de ciment et les agrégats naturels ;
- Les méthodes d'analyses telles que la DRX et l'IRTF ont révélé que la composition des mortiers légers LMEPVC est qualitativement identique et qu'aucune interaction chimique entre les espèces minérales et l'EPVC n'a pu conduire à la formation de nouveaux composés.

Ce travail de recherche montre qu'il est possible d'utiliser les déchets d'EPVC (FOREX) comme agrégats de substitution pour la production des matériaux de construction verts.

Dans le chapitre qui suit, on essaie de mettre en évidence l'influence de la présence des déchets d'EPVC sur le comportement des mortiers légers LMEPVC à hautes températures.



### Références bibliographiques

- [1] ASTM C 1437-01: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, 2001.
- [2] Rai B, Rushad ST, Kr B, Duggal S: Study of waste plastic mix concrete with plasticizer. *ISRN Civil Engineering* 2012, 2012.
- [3] Bhogayata A, Shah K, Vyas B, Arora N: Feasibility of waste metallised polythene used as concrete constituent. *Int J Eng Adv Technol* 2012, 1(5):204-207.
- [4] Corinaldesi V, Mazzoli A, Siddique R: Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste, *Construction and Building Materials* 2016, 123:281-289.
- [5] Matos AM, Nunes S, Sousa-Coutinho J: Cork waste in cement based materials. *Materials and Design* 2015, 85:230–239.
- [6] Boumhaout M, Boukhattem L, Hamdi H, Benhamou B, AitNouh F: Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. *Construction and Building Materials* 2017.135: 241–250.
- [7] Kismi M, Mounanga P : Comparaison performantielle à court et à long termes de Mortiers légers à base de déchets de mousse de polyuréthane rigide et de billes de polystyrène expansé, *INVACO* 2012.
- [8] Herki B, Khatib J, Negim E: Lightweight concrete made from waste polystyrene and fly ash. *World Applied Sciences Journal* 2013, 21(9):1356-1360.
- [9] Raut AN, Gomez CP: Thermal and mechanical performance of oil palm fiber reinforced mortar utilizing palm oil fly ash as a complementary binder. *Construction and Building Materials* 2016, 126:476-483.
- [10] Hannawi K, Kamali-Bernard S, Prince W: Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste management* 2010, 30(11):2312-2320.
- [11] Dulsang N, Kasemsiri P, Posi P, Hiziroglu S, Chindaprasirt P: Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste, *Materiel Design* 2016, 96: 350–356.
- [12] Saikia N, Brito Jd: Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Materials Research* 2013, 16(2):341-350.
- [13] Coppola B, Courard L, Michel F, Incarnato L, Di Maio L: Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. *Composites Part B: Engineering* 2016, 99:75-83.
- [14] Sadrmohtazi A, S. Milehsara D, Omran O L, Nik AS, The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *J. Clean. Prod* 2016. 112: 2363-2373.
- [15] Azhdarpour AM, Nikoudel M, Taheri M, The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials* 2016, 109: 55–62.
- [16] Alqahtani Fahad K, Iqbal Khan M, Ghataora G, Dirar S, Production of Recycled Plastic Aggregates and Its Utilization in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2017, 29 (4). DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001765).
- [17] Marzouk OY, Dheilly R, Queneudec M: Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste management* 2007, 27(2):310-318.
- [18] ŞimŞek B, Uygunoglu T: A Full Factorial-Based Desirability Function Approach to Investigate Optimal Mixture Ratio of Polymer Concrete. *Polymer Composites*, 2017, pp.1-13. DOI [10.1002/pc.24330](https://doi.org/10.1002/pc.24330).
- [19] Badache A, Benosman AS, Senhadji Y, Mouli M: Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density

- polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials* 2018, 163:40-52.
- [20] IS 13311-1: Method of Non-destructive testing of concrete – Methods of test, Part 1: Ultrasonic pulse velocity [*CED 2: Cement and Concrete*], *Indian Standard*, 1992, (Reaffirmed 2004).
- [21] ASTM: C 597, Standard test method for pulse velocity through concrete. *ASTM International, West Conshohocken, PA* 2009.
- [22] Rahmani E, Dehestani M, Beygi M, Allahyari H, Nikbin I: On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials* 2013, 47:1302-1308.
- [23] Gouasmi MT, Benosman AS, Taïbi H, Belbachir M, Senhadji Y: The physico- thermal properties of mortars made of composite aggregates "PET- siliceous sand", *J. Mater. Environ. Sci* 2016, 7 (2):409-415.
- [24] Benosman AS, Taïbi H, Senhadji Y, Mouli M, Belbachir M, and Bahlouli MI: Plastic Waste Particles in Mortar Composites: Sulfate Resistance and Thermal Coefficients, *Progress in Rubber. Plastics and Recycling Technology* 2017, 33(3):171-202.
- [25] Recommandation de la RILEM LC2, Classification fonctionnelle des bétons légers 1978.
- [26] Mounanga P, Gbongbon W, Poullain P, Turcry P: Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement and Concrete Composites* 2008, 30(9):806-814.
- [27] Benazzouk A, Douzane O, Mezreb K, Quéneudec M: Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste. *Cem. Concr. Comp* 2006. 28 (7): 650–657.

*Chapitre IV*

*Etude du Comportement sous  
Hautes Températures des  
Mortiers Légers LMEPVC*

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons traiter l'influence des hautes températures sur les mortiers composites LMEPVC. La nécessité d'évaluer les propriétés des LMEPVCs à hautes températures est l'un des paramètres indispensable pour évaluer le comportement de ces derniers vis-à-vis des différentes températures de chauffage.

L'objectif de cette partie est de donner une description du comportement des mortiers composite LMEPVC à température ambiante et à haute température.

Les mortiers légers LMEPVC sont soumis à des cycles de chauffage - refroidissement jusqu'à 450°C, 650°C et 850°C, à vitesse de 5 et 20 °C/min.

A l'issue de chaque traitement thermique, l'évolution des propriétés physiques, mécaniques, thermiques et les changements microstructurales sont analysés.

## IV.2. Influence de l'exposition à hautes températures sur les propriétés physico-mécaniques des LMEPVCs.

### IV.2.1. Perte de masse

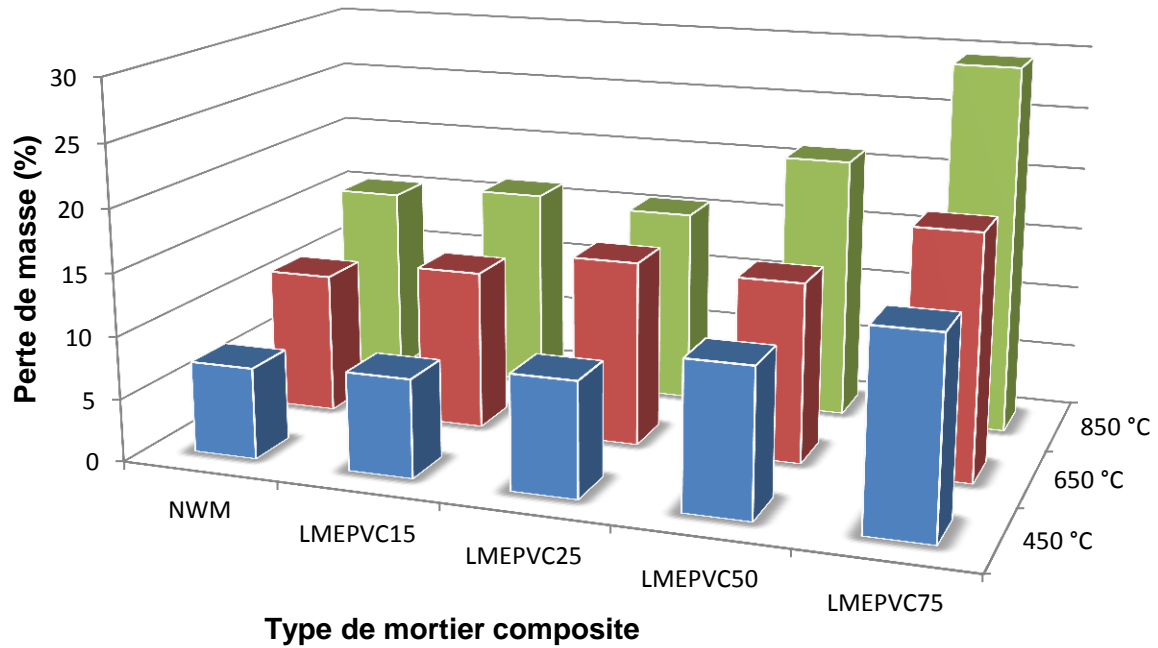
La perte de masse observée est proportionnelle à la quantité d'eau présente dans le mortier LMEPVC. Elle est aussi relative à l'altération de la microstructure du matériau. Elle est un indicateur important des dégradations physico-chimiques subies par les mortiers LMEPVC au cours du chauffage. Pour la déterminer, on mesure la masse globale des éprouvettes juste avant le chauffage et à la fin du traitement thermique.

$$\text{Perte de masse(\%)} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (\text{Eq. IV.1}).$$

Ou :  $m_i$  : La masse de l'éprouvette à température ambiante avant le chauffage ;

$m_f$  : La masse de l'éprouvette après la sortie du four.

La variation de la perte de masse en fonction de la température est présentée sur la figure IV.1.



**Figure IV.1 :** Perte de masse en fonction de la température pour les mortiers composites légers LMEPVC.

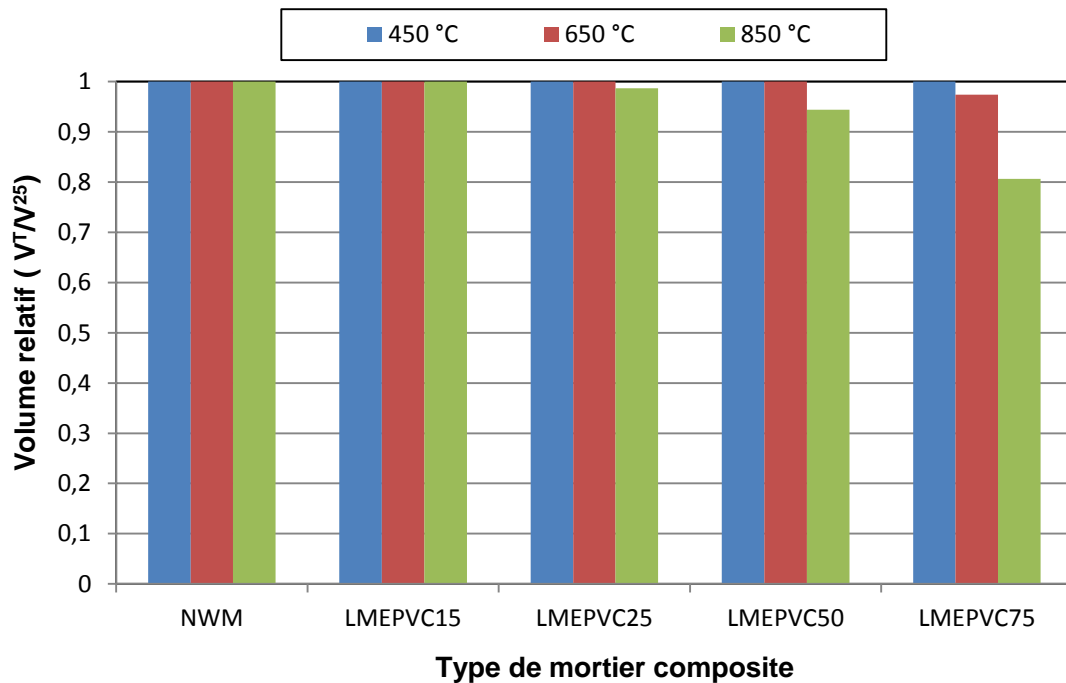
La perte de masse des composites LMEPVC présente pour la plage de température adoptée deux domaines différents. Dans le premier domaine, où la température varie de 450°C et 650°C : on note une variation de la perte en masse de 7,31-11,31% ; 7,87-12,77% ; 11,71-14,37% et 15,47-19,42% des composites LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75, respectivement. Pour les plages de ces températures, l'inclusion d'EPVC dans les mortiers composites LMEPVC conduit à une petite perte supplémentaire de la masse par rapport au NWM.

Pour les plages de 650°C et 850°C, les pertes de masse des mortiers composites sont plus importantes que celles du mortier de contrôle et augmentent progressivement avec le taux d'EPVC, et surtout pour les composites LMEPVC50 et LMEPVC75. Des résultats similaires ont été rapportés par certains auteurs qui travaillent sur la valorisation des agrégats des déchets légers [1, 2].

#### IV.2.2. Volume des éprouvettes après chauffage

Les dimensions des éprouvettes (longueur, largeur et hauteur) ont été calculées par la moyenne de trois mesures pour chaque dimension et pour chaque éprouvette. Pour la mesure des dimensions des éprouvettes, on a utilisé le pied à coulisse de précision de 0,01 mm

La mesure de la longueur, largeur et la hauteur des éprouvettes a permis de calculer le volume apparent de chaque éprouvette des différents mortier composites LMEPVC après chaque cycle de chauffage. La variation du volume des éprouvettes est présentée sur la figure IV.2.



**Figure IV.2 :** Variation du volume des éprouvettes des composites mortiers légers LMEPVC en fonction de la température.

Aucun changement n'est observé dans le volume des éprouvettes des mortiers LMEPVC jusqu'à la température de 450°C.

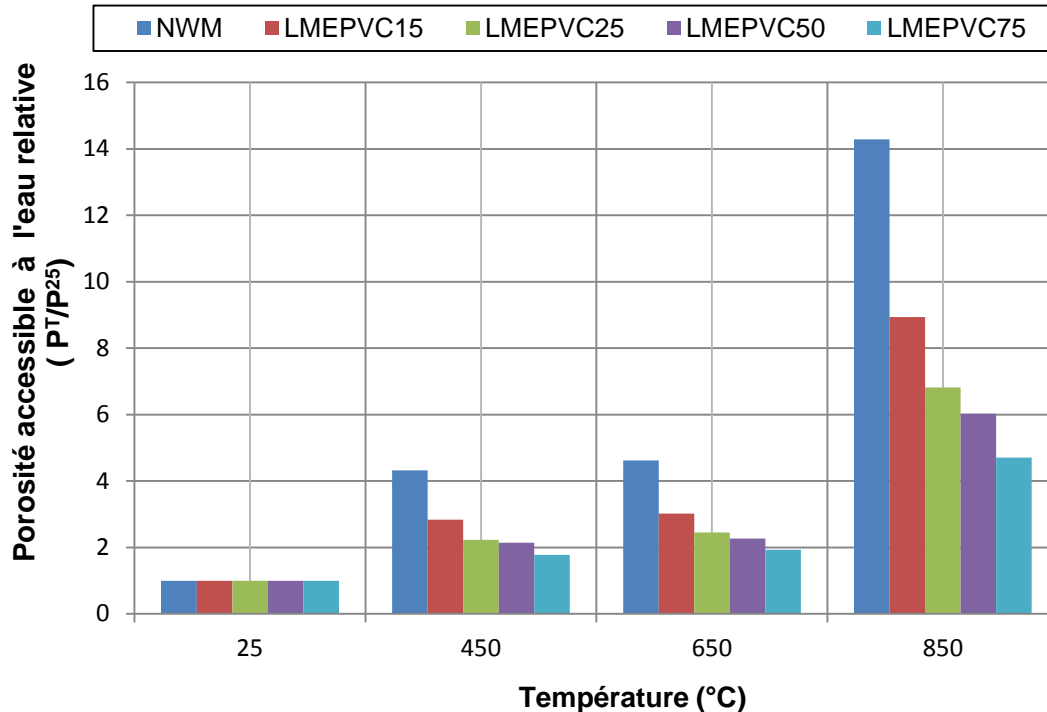
À 650°C, une diminution de l'ordre de 4 % est obtenue pour le mortier LMEPVC75. Par ailleurs, aucune variation n'est observée pour les autres mortiers.

À 850°C, le mortier LMEPVC75 montre la plus grande diminution du volume qui est de l'ordre de 19%. Par ailleurs, le volume des mortiers LMEPVC25 et LMEPVC50 atteint une diminution de l'ordre de 11 % et 16 % par rapport à la température ambiante, respectivement.

La variation du volume dépend de la température d'exposition et du pourcentage des agrégats d'EPVC inclus dans le mortier léger. Car, plus ce pourcentage augmente, plus la diminution du volume augmente à très hautes températures.

### IV.2.3. Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau relative des échantillons des mortiers légers LMEPVC exposés aux différentes températures est reportée sur la figure IV.3.



**Figure IV. 3 :** Porosité accessible à l'eau relative des mortiers composites légers LMEPVC en fonction de la température de chauffage.

La figure IV.3 révèle que la porosité augmente avec l'augmentation de la température d'exposition.

Jusqu'à la température de 650°C, la figure IV.3 présente une légère augmentation de la porosité avant que cette dernière augmente rapidement et surtout pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC25 à température de 850 °C.

L'exposition à la température de 650°C provoque pour le mortier NWM une augmentation de la porosité 2 fois plus grande par rapport au composite LMEPVC75.

A 850°C, l'endommagement des échantillons était avancé pour permettre une mesure fiable de la porosité.

La variation de la porosité est essentiellement due à la dégradation microstructurale du matériau, soit l'ouverture des fissures, et non à d'autres phénomènes comme par exemple une coalescence des pores.

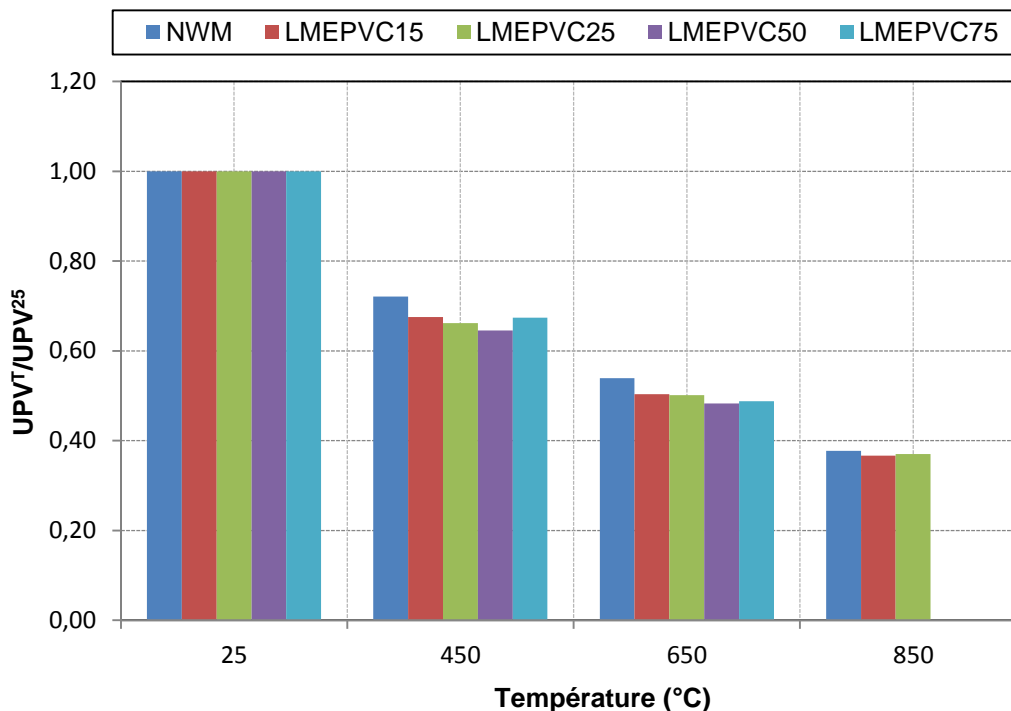
L'augmentation de la porosité peut être due au départ d'eau qui augmente le volume poreux et l'apparition des microfissures dans la matrice [1]. Lors du chauffage, des



transformations intervenant au cœur de la pâte de ciment, notamment la décomposition des hydrates et les déformations différentielles entre la pâte et les granulats qui génèrent une augmentation de la porosité [2, 3].

#### IV.2.4. Vitesse de propagation des ondes sonores UPV

Les résultats de l'UPV relative des mortiers légers LMEPVC, à différentes température d'exposition, sont donnés par la figure IV.4.



**Figure IV. 4 :** L'UPV relatives des mortiers légers LMEPVC en fonction de la température du chauffage.

On constate que l'UPV diminue à mesure que la température du chauffage augmente dans tous les mélanges. Il est également à noter que le pourcentage de diminution de l'UPV varie de 32 à 50%, de 34 à 50%, de 35 à 52% et de 33 à 51% pour les composites LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75 par rapport au NWM à 450°C et 650°C, respectivement.

A 850°C, l'endommagement des échantillons LMEPVC50 et LMEPVC75 était trop avancé pour permettre une mesure fiable de l'UPV.

L'incorporation des agrégats d'EPVC dans la matrice cimentaire révèle à la fois la capacité des composites à réduire l'UPV et surtout pour la température élevée (650°C). Ceci est en accord avec les résultats d'études menées par Rahmani et al. [4], Albano et al. [5].

La qualité du mortier peut être estimée en mesurant l'UPV selon la classification de la norme IS 13311-1-92 [6] énumérée dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** : La qualité des mortiers composites suivant la norme IS 13311-1-92, à 25°C et après l'exposition à une température de 650°C.

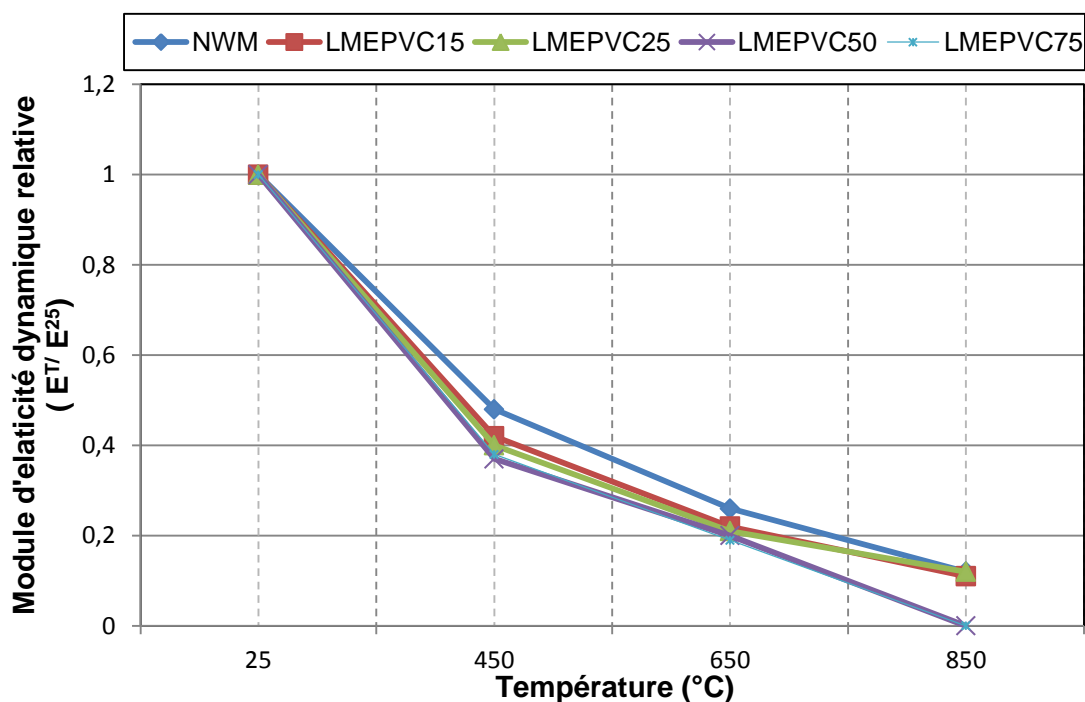
composites	UPV (Km/s) 25°C	Qualité du mortier	UPV (Km/s) 650°C	Qualité du mortier
NWM	4.19	Bon	2.22	Mauvais
LMEPVC15	3.89	Bon	1.97	Mauvais
LMEPVC25	3.65	Bon	1.85	Mauvais
LMEPVC50	3.32	Moyenne	1.62	Mauvais
LMEPVC75	2.69	Mauvais	1.40	Mauvais

#### IV.2.5. Module d'élasticité dynamique

La figure IV.5 présente les valeurs du module d'élasticité relative à 25°C et après l'exposition aux différentes températures. Ces modules d'élasticité expriment l'évolution de la rigidité du matériau en fonction de la température d'exposition.

A partir de la figure IV.5, on peut observer une diminution du module d'élasticité avec l'augmentation de la température. Cette baisse du module d'élasticité résulte de l'endommagement produit par le chauffage.

De 25°C jusqu'à 450°C, on observe une diminution rapide du module d'élasticité avec l'augmentation de la température pour les différents types des mortiers LMEPVC.



**Figure IV. 5 :** Le module d'élasticité dynamique relative des mortiers légers LMEPVC en fonction de la température du chauffage.

A 450°C, on observe une diminution de 45, 48, 60, 63 et 62% pour les mortiers NWM, LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75, respectivement. Cette diminution peut s'expliquer par la microfissuration engendrée dans les éprouvettes testées et bien entendu par la déshydratation qui entraîne une augmentation de la porosité contribuant à l'endommagement des mortiers composites LMEPVC et l'évaporation de l'eau liée [7, 8].

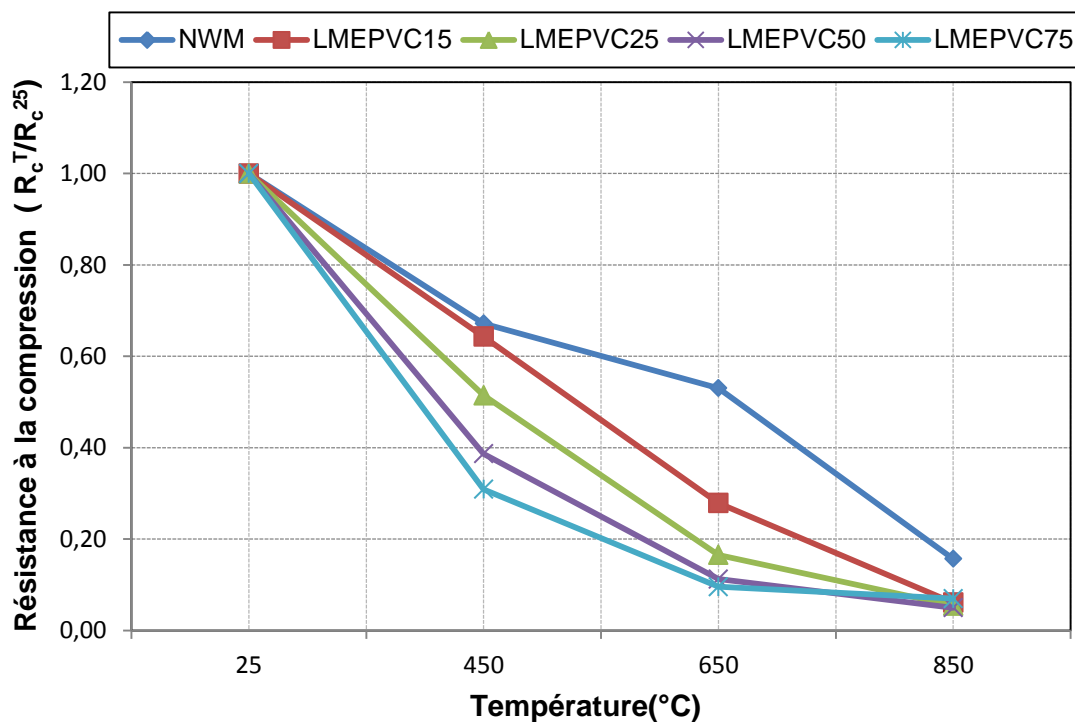
On note que la dégradation des mortiers légers LMEPVC est remarquée dès que la température atteint les 650°C, mais ils restent capables de supporter des températures de plus en plus élevées, jusqu'à ce qu'ils atteignent le même taux de perte de module d'élasticité que le mortier témoin. Ce qui nous permet de conclure que les mortiers LMEPVC sont rigides face aux hautes températures.

#### IV.2.6. Caractérisation mécanique des LMEPVCs à hautes températures

Les propriétés mécaniques des mortiers avant et après les sollicitations thermiques ont été déterminées grâce aux essais de compression, de traction par flexion et la détermination du facteur d'endommagement. Ces essais permettent d'évaluer l'incidence des sollicitations thermiques sur le comportement relative des mortiers légers LMEPVC.

### IV.2.6.1. Résistance à la compression

La figure IV.6 présente les résultats de la résistance à la compression relative des essais réalisés à température ambiante et après le traitement thermique pour l'ensemble des mortiers légers LMEPVC.



**Figure IV. 6 :** La résistance à la compression relative des composites mortiers légers LMEPVC à différentes températures.

La figure IV.6 révèle que la résistance à la compression relative des composites mortiers légers LMEPVC diminue régulièrement avec l'augmentation de la température dans la première phase (25 - 450 °C), plus rapidement dans la seconde phase (450 - 650 °C) et avec une forte chute dans la troisième phase où la température égale à 850 °C.

Tous les composites LMEPVCs perdent une grande valeur de ces résistances à la compression initiale lorsque les composites testés sont exposés à une température de 850 °C par rapport au mortier témoin.

La diminution de la résistance à la compression dans la première et la deuxième phase peut être attribuée à une déshydratation progressive dans la matrice cimentaire. Dans la troisième région, la forte diminution de la résistance à la compression pourrait être due à la déshydratation de silicate de calcium (CSH) et à la décomposition des hydroxydes de calcium [9]. Néanmoins, la matrice cimentaire limite la décharge de la vapeur d'eau, ce qui entraîne

une pression des pores et une propagation des microfissures dans le matériau cimentaire, conduisant ainsi à une résistance inférieure à la compression [7, 10, 11].

### IV.2.6.2. Facteur d'endommagement

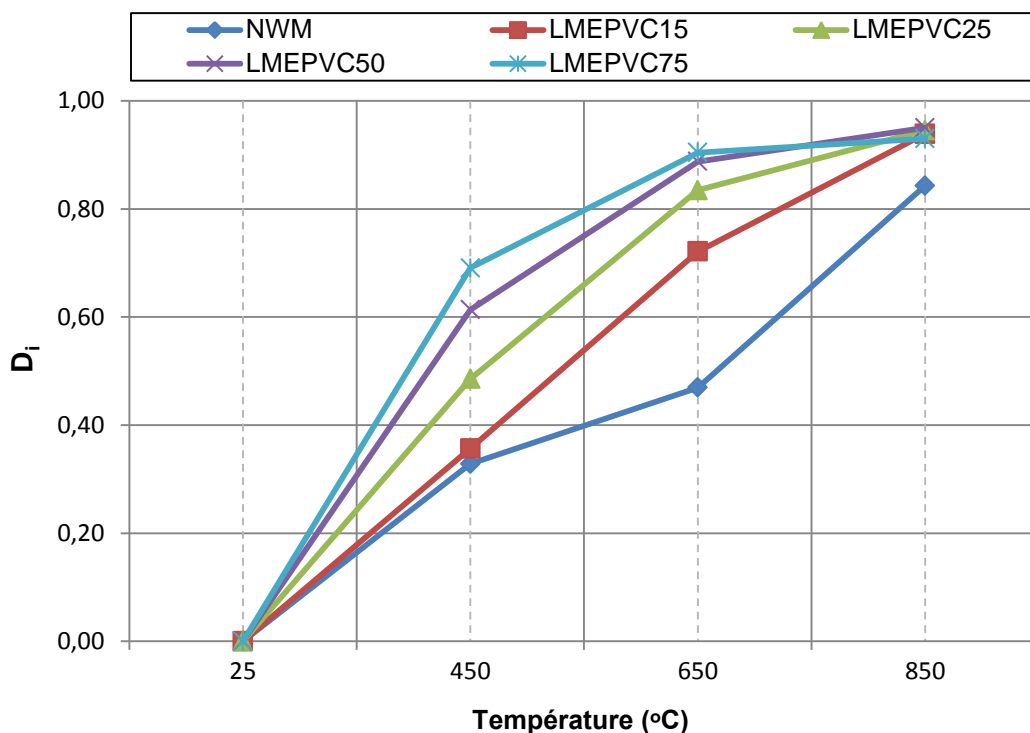
L'évolution de l'endommagement après le test du chauffage a été faite par un facteur D qui a été utilisé par Lemaitre [12] pour identifier la variation du dommage entre un matériau sain ( $D = 0$ ) et celui du matériau endommagé ( $D = 1$ ).

On a déduit le facteur d'endommagement après les essais de la résistance à la compression, qui est exprimé par l'équation suivante:

$$D_i = 1 - (f_i^T / f_i^{25}) \tag{Eq. IV.2}$$

Où :  $f_i^T$  : la résistance à la compression des éprouvettes, à température élevées T (°C).

$f_i^{25}$  : la résistance à la compression correspondante mesurée à température ambiante  $25 \pm 2^\circ \text{C}$ .



**Figure IV. 7 :** Le facteur d'endommagement des mortiers légers LMEPVC en fonction de la température du chauffage.

D'après la figure IV.7, le facteur d'endommagement  $D_i$  du mortier NWM est plus petit que celui des mortiers composites LMEPVC.

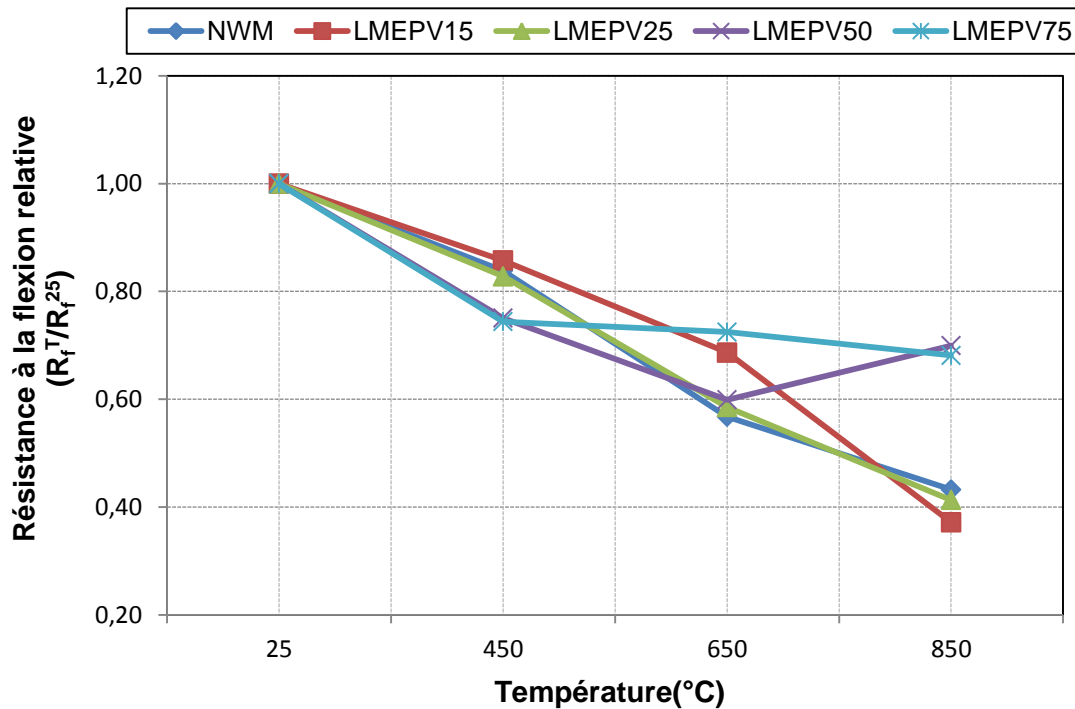
Le facteur d'endommagement des composites LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75 est plus grand de 0,03 ; 0,16 ; 0,29 et 0,36 à 450 °C et de 0,25 ; 0,37 ; 0,42 et 0,43 à 650 °C par rapport au mortier témoin NWM. D'autre part, pour une exposition thermique de 850°C, on a remarqué que les facteurs d'endommagement des composites LMEPVC sont convergents et se rapprochent de ceux du mortier témoin NWM.

### **IV.2.6.3. Résistance à la flexion**

La figure IV.8 présente l'évolution de la résistance relative à la flexion en fonction de la température de l'exposition.

Les résultats de la résistance à la flexion sont néanmoins similaires à ceux obtenus pour la résistance à la compression. Tous les composites LMEPVC ou mortier de référence, présentent la même allure générale. Les courbes de la résistance résiduelles à la flexion présentent clairement deux paliers, avec un assez bon maintien de la résistance jusqu'à 450°C et une perte des performances beaucoup plus franche au-delà de 650°C.

A 850°C, les mortiers composites LMEPVC50 et LMEPVC75 présentent la plus faible chute de la résistance à la flexion comparée aux autres mortiers, en raison de la plus grande teneur en EPVC. Ceci est peut être dû à la nature physico-chimique des agrégats d'EPVC. L'interface entre la pâte de ciment et les granulats aura également un rôle important dans le maintien des propriétés mécaniques des mortiers composites LMEPVC en fonction de la température. Ceci corrobore le résultat trouvé par Albano et al. [5], Ozbakkaloglu et al. [7] et Badache [11].

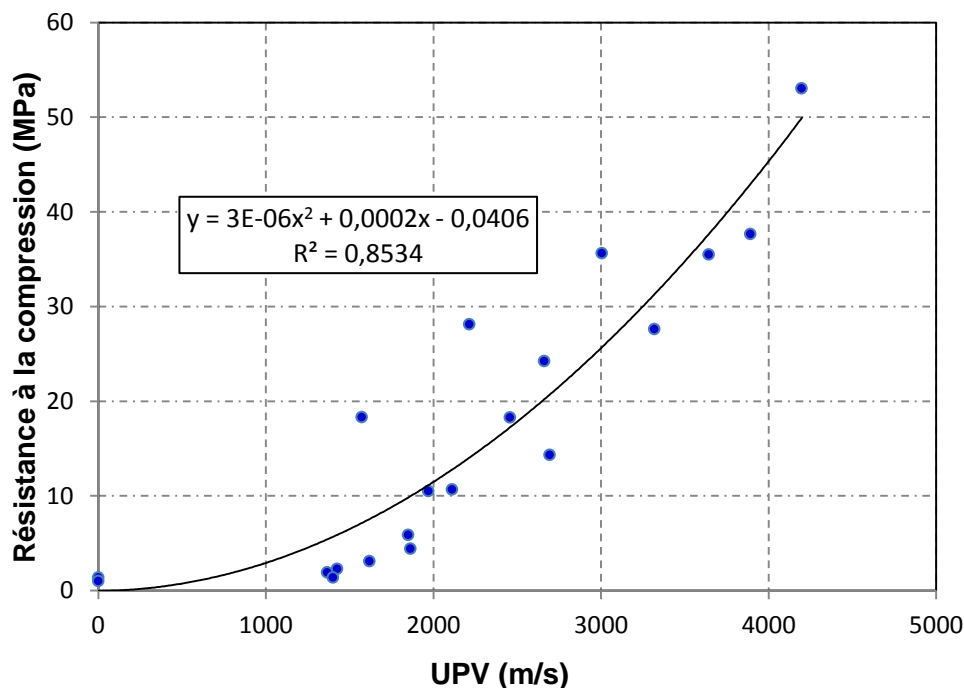


**Figure IV. 8 :** La résistance à la flexion relative des mortiers légers LMEPVC en fonction de la température du chauffage.

#### IV.2.6.4. Corrélation entre l'UPV et la résistance à la compression

D'après la figure IV.9, la résistance à la compression des mortiers LMEPVC pour toutes les températures de chauffage varie en fonction de l'UPV (Vitesse de propagation des ondes sonores) selon l'expression suivante:  $R_c = 1.004 e^{0.001UPV}$ , avec un coefficient de corrélation de  $R^2 = 0,8534$ . Cette valeur du coefficient de corrélation indique que la résistance à la compression a une forte relation avec l'UPV et que la pertinence de déterminer l'UPV comme expéditeur et essai non destructif pour estimer la résistance à la compression des mortiers LMEPVC exposés au feu.





**Figure IV. 9 :** Corrélation entre la résistance à la compression et l'UPV des mortiers légers LMEPVC exposés aux hautes températures.

### IV.3. Examen visuel des éprouvettes LMEPVCs à hautes températures

Dans le processus du traitement thermique des mortiers composites LMEPVC, plusieurs changements de la forme, la surface et la couleur des éprouvettes ont été observés visuellement et ils sont illustrés par les figures IV.10, IV.11 et le tableau IV.2.



**Figure IV. 10 :** Etat de la surface des éprouvettes des mortiers : (a) LMEPVC75 ; (b) NWM à différentes températures d'exposition.



**Figure IV. 11** : Etat des éprouvettes des mortiers :  
(c) NWM ; (d) LMEPVC75, à 850°C.

De 25°C à 650°C, les façades extérieures des échantillons n'ont révélé aucune détérioration observée. On note que la dégradation du mortier témoin est remarquée dès que la température atteint 850°C.

La comparaison qualitative de la géométrie des deux éprouvettes NWM et LMEPVC75 à 850°C, indique que la courbure de l'éprouvette du mortier LMEPVC est beaucoup plus importante que pour le cas du mortier NWM. On observe aussi une réduction du volume des échantillons LMEPVC 75 et leur couleur passait du gris au gris brunâtre.

Le changement de la couleur est dû à la nature des agrégats d'EPVC qui constituent principalement le PVC qui est de nature organique.

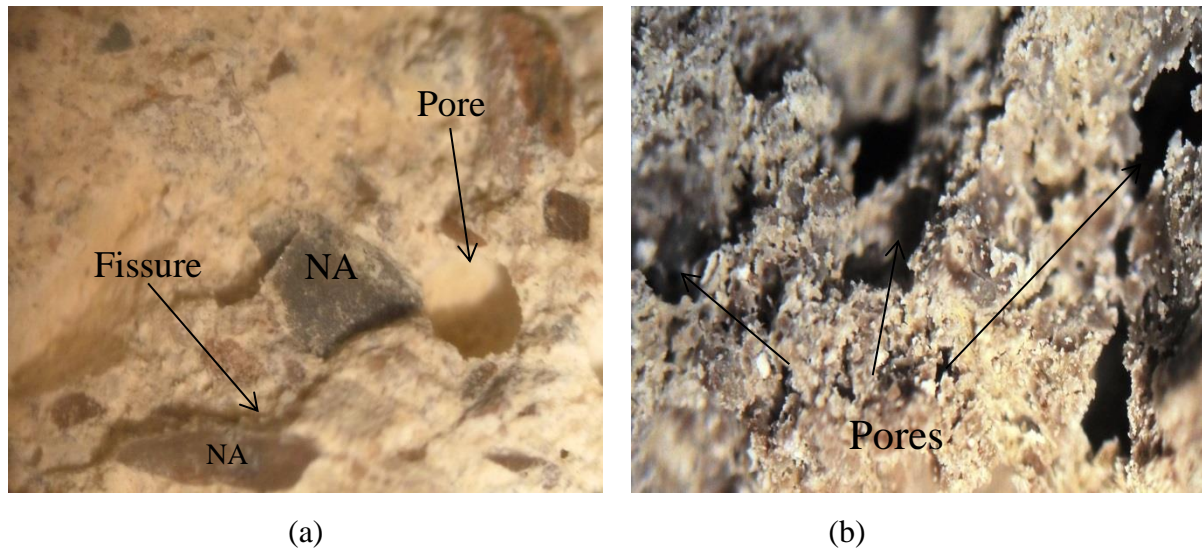
**Tableau IV.2** : Caractéristiques physiques des mortiers à diverses températures.

Température (°C)	Epreuves	Caractéristiques de la surface		
		Forme/volume	Couleur	Texture
25	NWM	Prismatiques parfaits	Gris clair	Lisse
	LMEPVC15	Prismatiques parfaits	Gris clair	Lisse
	LMEPVC25	Prismatiques parfaits	Gris clair	Lisse
	LMEPVC50	Prismatiques parfaits	Gris clair	Lisse
	LMEPVC75	Prismatiques parfait	Gris clair	Lisse
450	NWM	Prismatiques parfaits	Gris clair	Lisse
	LMEPVC15	Prismatiques parfaits	Gris clair	Lisse
	LMEPVC25	Prismatiques parfait	Gris clair	Lisse
	LMEPVC50	Prismatiques parfait	Gris clair	Lisse
	LMEPVC75	Prismatiques parfaits	Gris clair	Lisse
650	NWM	Prismatiques parfaits	Gris	Lisse
	LMEPVC15	Prismatiques parfaits	Gris	Lisse
	LMEPVC25	Prismatiques parfait	Gris	Lisse
	LMEPVC50	Prismatiques parfaits	Gris	Lisse
	LMEPVC75	Prismatiques parfait	Gris	Lisse
850	NWM	Bordures détruites	Gris blanchâtre	fissures
	LMEPVC15	Bordures détruites	Gris blanchâtre	poreux
	LMEPVC25	Bordures détruites	Gris blanchâtre	poreux
	LMEPVC50	Volume réduit	Gris brunâtre	poreux
	LMEPVC75	Volume réduit	Gris brunâtre	microfissure

## IV.4. Caractérisation microstructurale des LMEPVCs à hautes températures

### IV.4.1. Microscopie optique (MOP)

L'état de l'adhérence entre les agrégats et la matrice cimentaire des échantillons des mortiers NWM et LMEPVC75 après le chauffage à 850 °C a été examinée à l'aide d'un microscope optique et illustré sur les figure IV.12 (a) et (b).



**Figure IV. 12 :** Images obtenues par MOP à 850 °C des mortiers composites :  
(a) NWM ; (b) LMEPVC75. NA : Agrégat naturel.

Après un chauffage à 850°C, on constate alors l'apparition des fissures clairement visibles à l'œil nu. Elles apparaissent principalement aux interfaces « pâte- granulat» et se propagent de façon radiale dans la matrice entre les granulats proches.

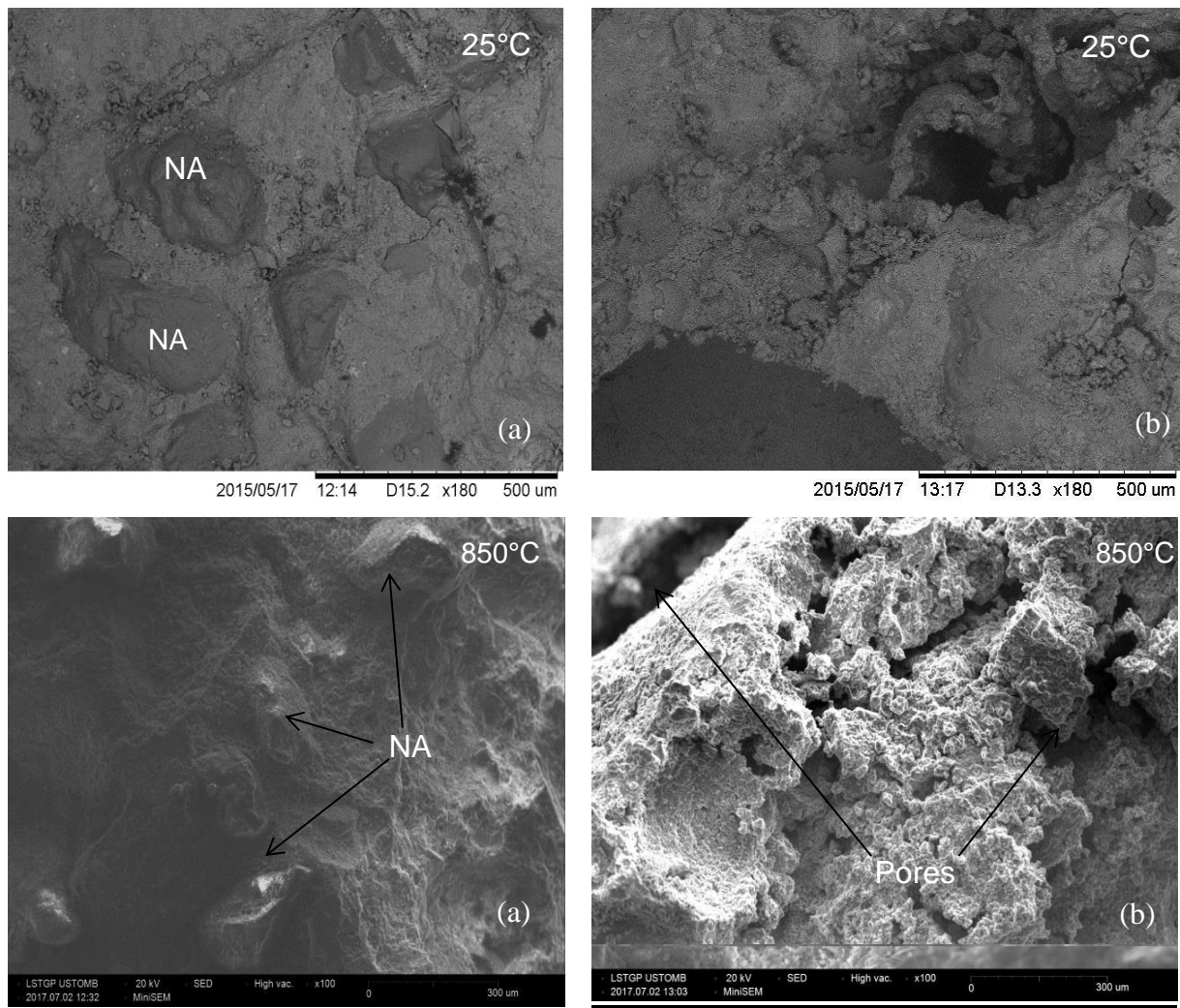
Dans les mortiers, l'interface pâte-granulat est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la mieux cristallisée. A haute température cette partie, appelée aussi zone de transition interfaciale (ITZ), se dégrade progressivement en montant en température .

L'hypothèse de la combustion des déchets des agrégats EPVC a été confortée visuellement par l'apparition de la couleur noir sur la photo marquée à 850°C du mortier composite LMEPVC75. On observe également l'augmentation de la porosité de la matrice, plus particulièrement en périphérie des grains (aux interfaces pâte/granulat).

### IV.4.2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Des analyses microstructurales, menées au MEB, des mortiers NWM et LMEPVC75 à 25°C et 850°C sont exhibé par la figure IV.13.





**Figure IV. 13 :** Observation au MEB à température ambiante 25 °C et après une cuisson à 850°C des composites : (a) NWM ; (b) LMEPVC75. NA : agrégats naturel.

Les photos MEB obtenus à 25°C montrent bien les granulats naturels et les granulats d'EPVC au sein du liant cimentaire des composites NWM et LMEPVC75.

Après cuisson à 850°C et pour le mortier NWM, les granulats naturels sont encore visibles mais une partie de ces derniers a commencé à se vitrifier. Pour le mortier, cette température est située dans une plage où coexistent à chaud des phases solides et des phases liquides.

L'élévation de la température de cuisson jusqu' à 850°C transforme complètement la morphologie des composites LMEPVC75 comme l'indique l'image de la figure IV.13b (850°C). On constate qu'à cette température qu'il y a une présence importante des cristaux de la calcite. Les granulats d'EPVC sont beaucoup plus sensibles sous haute température. Ainsi, lors de leurs cuissons, les granulats d'EPVC forment des agglomérats amorphes. Cette association sous ces conditions de sollicitation à 850°C, la matrice du mortier LMEPVC75

conduit à la création de nombreux pores et de nombreuses cavités qui impliquent une forte modification des propriétés mécaniques. Pour cela, les mortiers LMEPVC75 présentent des propriétés thermiques un peu différentes de celle des mortiers témoins, avec notamment une plus faible conductivité thermique et une plus forte diminution des propriétés mécaniques avec la température, liées à leur plus grande porosité.

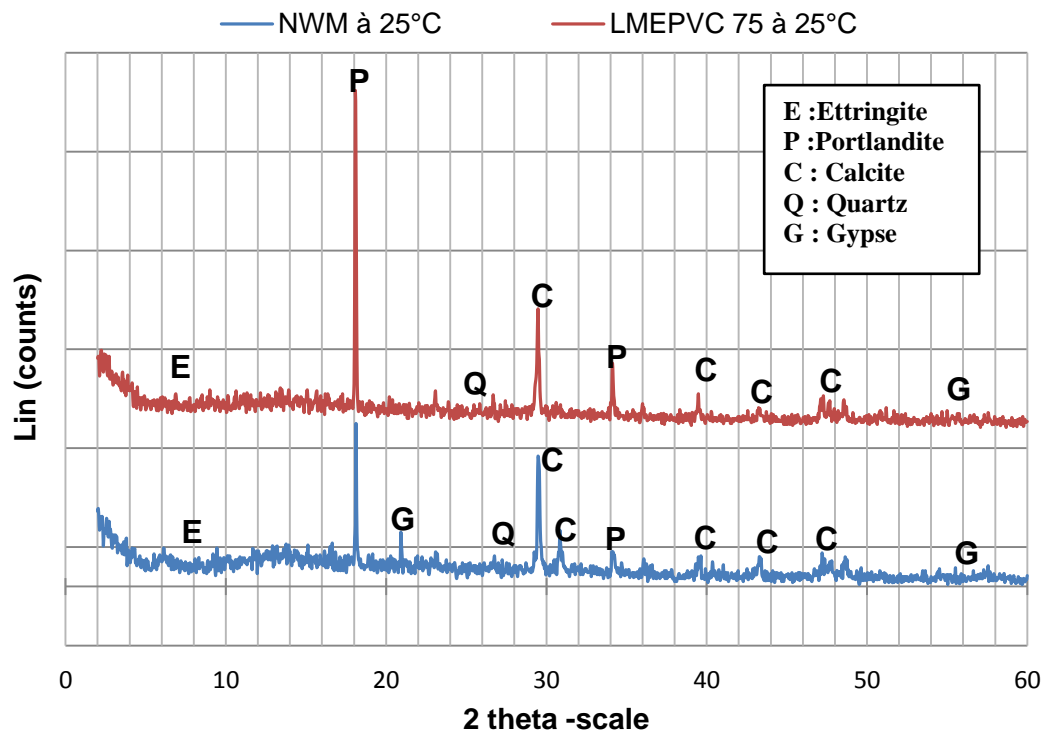
#### **IV.4.3. Diffraction des rayons X (DRX)**

Les spectres DRX des mortiers composites NWM et LMEPVC75 à 25°C sont illustrés par la figure IV.14.

La portlandite est caractérisée par un fort signal détecté à l'angle de  $18.09^\circ 2\theta$  correspondant à la raie principale, et un pic secondaire moins important est détecté à l'angle de  $34.09^\circ 2\theta$ .

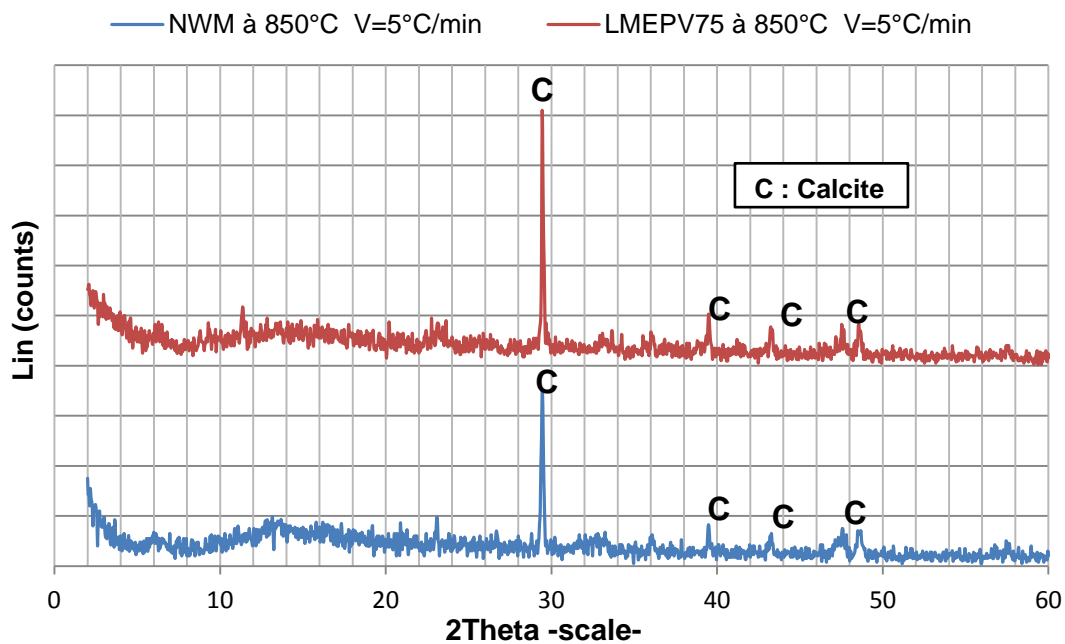
L'hydratation du ciment continue, avec la présence des phases minéralogiques suivantes :

- La raie d'étringite de faible intensité, identifiée à l'angle de  $9^\circ 2\theta$  (pic majeure) ;
- La calcite  $\text{CaCO}_3$  avec son pic majeur de  $29.41^\circ 2\theta$ , et les autres raies secondaires moins importantes sont détectées aux angles de  $31,44^\circ$  ;  $39,48^\circ$  ;  $43.22^\circ$  et  $48,56^\circ 2\theta$  ;
- Les pics vers  $23,02^\circ$  et  $55,9^\circ 2\theta$  caractérisent la formation du gypse ;
- Le quartz se caractérise par le pic majeur vers  $26.6^\circ 2\theta$ .



**Figure IV. 14 :** Superposition des spectres DRX des mortiers composites NWM et LMEPVC75 à 25°C.

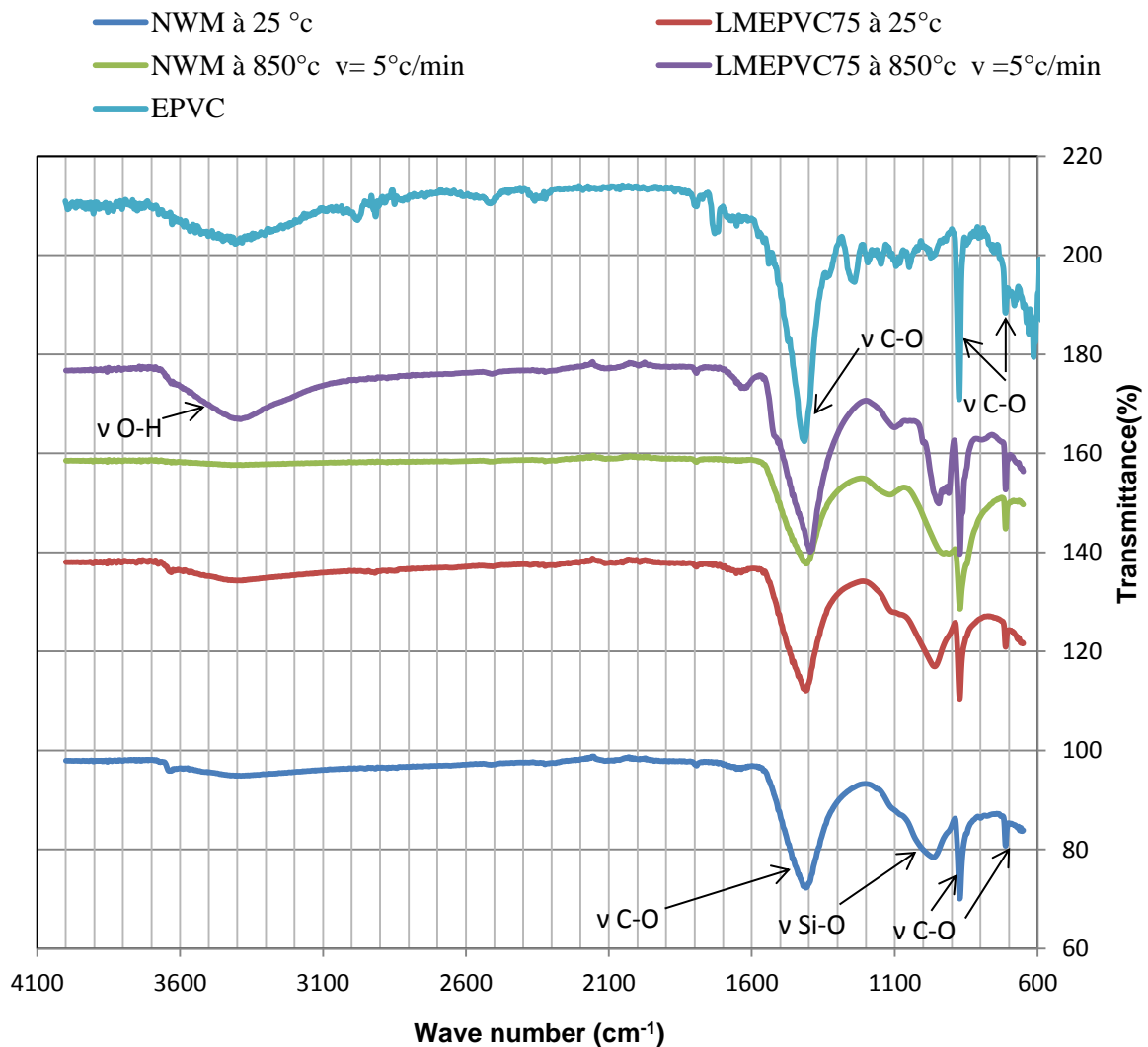
Les spectres DRX des mortiers NWM et LMEPVC75 à 850°C sont illustrés par la figure IV.15. L'analyse révèle également la présence importante de la calcite et il est intéressant d'observer que tous les pics relatifs aux autres produits d'hydratation sont disparus (Ex : déshydroxylation de la portlandite).



**Figure IV. 15 :** Superposition des spectres DRX des mortiers composites NWM et LMEPVC75 à 850°C ( $V=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ).

#### IV.4.4. Spectrométrie infrarouge (IRTF)

La figure IV.16 présente la superposition des spectres IRTF des mortiers composites NWM et LMEPVC75 à 25°C et à 850°C ( $V=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) et de l'EPVC. Le tableau IV.3 montre bien l'attribution des bandes infrarouges des mortiers composites avant et après exposition aux différentes températures et aussi les agrégats d'EPVC.



**Figure IV. 16 :** Superposition des Spectres Infrarouges du composite NWM, LMEPVC75 a 25°C et 850°C et les agrégats EPVC à 25°C.



**Tableau IV. 3** : Attribution des bandes infrarouges des mortiers composites avant et après exposition aux différentes températures et les agrégats d'EPVC.

Bandes IRTF caractéristiques (cm <sup>-1</sup> )	Groupement chimique	Constituants	NWM		LMEPVC75		EPVC
			25°C	850°C	25°C	850°C	25°C
3160-3650	H <sub>2</sub> O, OH, liaisons hydrogènes	Gypse, CSH	+	/	+	/	/
~ 3648	H <sub>2</sub> O, OH, liaisons hydrogènes	Hydrate hexagonale Portlandite	+	/	+	/	/
3455-3490	H <sub>2</sub> O, OH	AFm, AFt	+	/	+	/	/
1615-1625	H <sub>2</sub> O, v O-H		+	/	+	/	/
1418-1428	v C-O	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	+	++	+	++	++++
870-873	v C-O	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	+	++	+	++	++++
710-713	v C-O	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	+	++	+	++	++++
~ 1020-1090	v Si-O	Vibrations des CSH	+	/	+	/	/
Bandes d'harmoniques	~2971	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	+	++	+	++	++++
	2865-2885	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	+	++	+	++	++++
	2511-2520	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	+	++	+	++	++++
	~ 1760-1766	CaCO <sub>3</sub> (Calcite)	+	++	+	++	++++

/ : Absence d'élément ; + : Présence d'élément, ++ : Présence en quantité importante ; AFt: C(A,F).3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O; AFm: C<sub>3</sub>A.3CaSO<sub>4</sub>.12H<sub>2</sub>O .

Les méthodes des analyses DRX et IRTF ont révélé que la composition des matériaux est qualitativement identique et qu'aucune interaction chimique entre les espèces minérales et l'EPVC, après le cycle de chauffage-refroidissement n'a conduit à une formation de nouveaux composés.

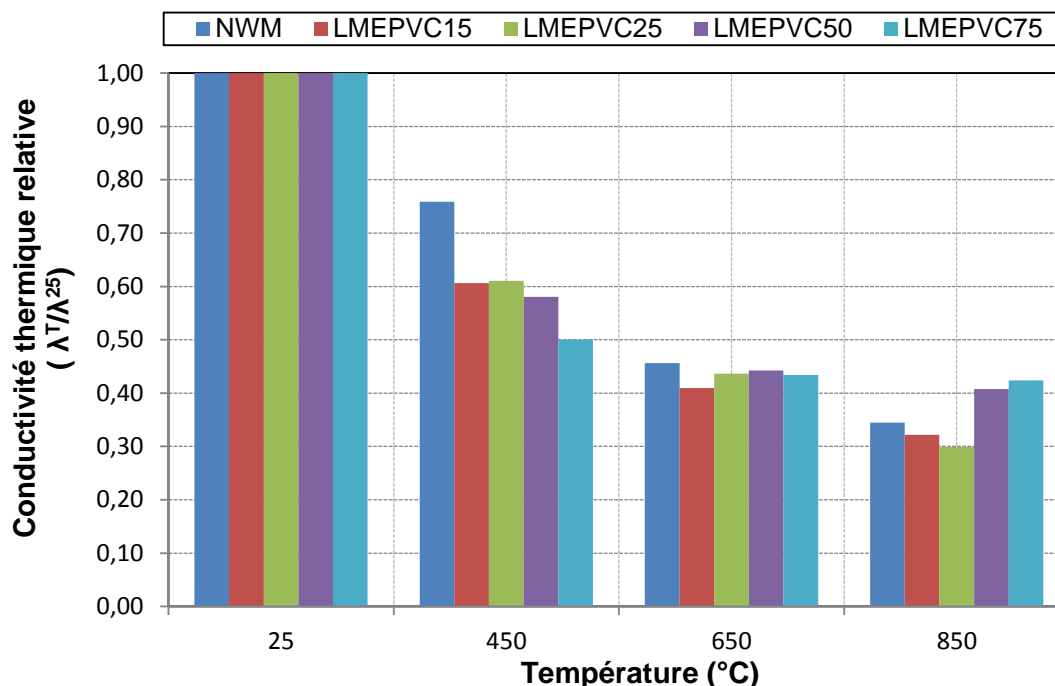
#### IV.5. Evolution des propriétés thermiques en fonction de la température

L'étude des propriétés thermiques des mortiers composites LMEPVC est primordiale pour caractériser et interpréter leur comportement à haute température.

La connaissance des propriétés thermiques comme la conductivité ou la chaleur spécifique permet d'évaluer la distribution de la température au sein du matériau, et donc d'anticiper la distribution des contraintes et des instabilités thermiques qui peuvent en résulter.

### IV.5.1. Conductivité thermique ( $\lambda$ )

La figure IV.17 exhibe la variation de la conductivité thermique des mortiers composites légers LMEPVC à 25, 450, 650 et 850°C.



**Figure IV. 17 :** La conductivité thermique relative des mortiers composites LMEPVC.

L'analyse de la figure IV.17 montre que toutes les conductivités thermiques des mortiers diminuent avec la température, Cette baisse de la conductivité résulte de l'endommagement produit par le chauffage des mortiers.

De 450°C jusqu'à 650°C, on observe une diminution progressive de la conductivité thermique des différents mortiers avec l'augmentation de la température.

On observe, aussi, une diminution de 34%, 40%, 40%, 42% et 50% dans la température de 450°C et de 54%, 59%, 56%, 56% et 57% dans la température de 650°C pour les mortiers NWM, LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75, respectivement.

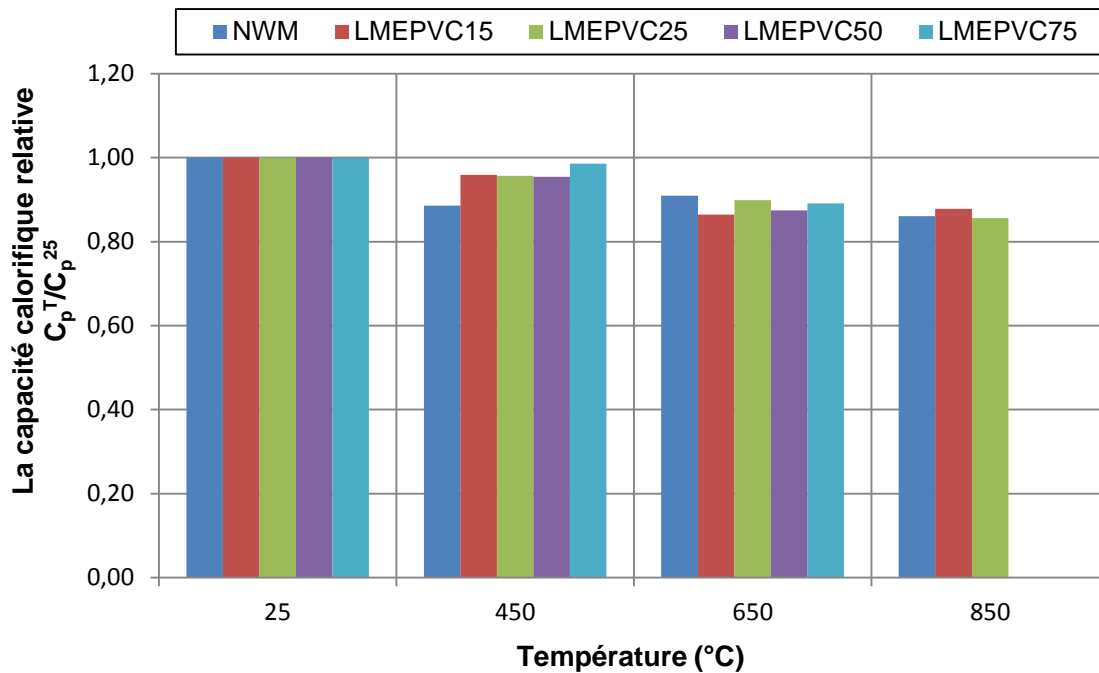
À 850°C, la conductivité thermique des mortiers NWM a baissé de 66%. Par ailleurs, la conductivité thermique des mortiers LMEPVC50 et LEPVC75 atteinte une diminution de 59% et 58% par rapport à la température ambiante, respectivement.

La diminution de la conductivité thermique avec la température pour tous les mortiers LMEPVC est liée à l'association de différents phénomènes ; le départ de l'eau liée qui présente une forte conductivité thermique, la diminution du nombre de liaisons conductrices liée à la décomposition des hydrates (ettringite puis CSH), l'apparition de microfissures [8,

13, 14] et la décomposition des phases du carbonate de calcium (calcite, EPVC) autour de 850°C [15].

#### IV.5.2. Capacité calorifique (Cp)

La figure IV.18 illustre la variation de la capacité calorifique des mortiers légers LMEPVC par rapport à la température ambiante.



**Figure IV.18 :** La capacité calorifique relative à hautes températures par rapport à la température ambiante des mortiers LMEPVCs.

L'analyse de la figure IV.18 montre que toutes les valeurs des capacités calorifiques des mortiers diminuent avec l'augmentation de la température.

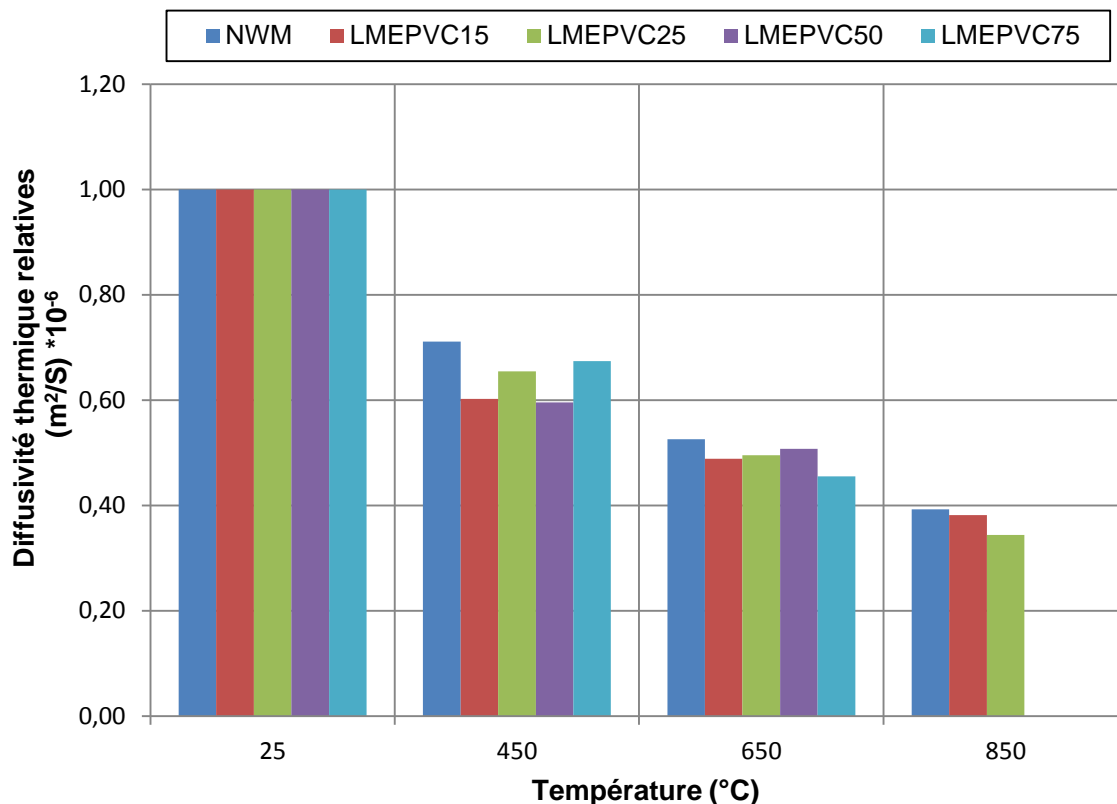
On peut noter que pour des températures allant jusqu'à 450°C, la capacité calorifique des LMEPVCs est plus faible de 11% à 15% que celle obtenue à 25°C. Autour de 650°C, on constate une variation de la diminution de la capacité calorifique entre 13% à 15% pour les différents LMEPVCs.

À 850°C, la capacité calorifique des mortiers NWM a baissé de 15%. Par ailleurs, l'endommagement des échantillons LMEPVC50 et LMEPVC75 était trop avancé pour permettre une mesure fiable.

Ceci est expliqué par l'endommagement du matériau (déshydratation, fissuration, décomposition et l'incompatibilité de la déformation entre la pâte et les granulats).

### IV.5.3. Diffusivité thermique (a)

La figure IV.19 illustre la variation de la diffusivité thermique des mortiers légers LMEPVC par rapport à la température ambiante.



**Figure IV. 19 :** La diffusivité thermique relative à hautes températures par rapport à la température ambiante des mortiers LMEPVC.

L'analyse de la figure IV.19 montre, comme dans le cas de la conductivité thermique, une diminution de la diffusivité thermique de tous les mortiers LMEPVCs avec l'augmentation de la température de chauffage.

On observe une diminution de 29%, 30%, 35%, 30% et 33% pour la température de 450°C et de 46%, 51 %, 50%, 50% et 44% pour la température de 650°C concernant les mortiers NWM, LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75, respectivement.

À 850°C, la capacité calorifique des mortiers NWM a baissé de 61%. Par ailleurs, l'endommagement des échantillons LMEPVC50 et LMEPVC75 était trop avancé pour permettre une mesure fiable.

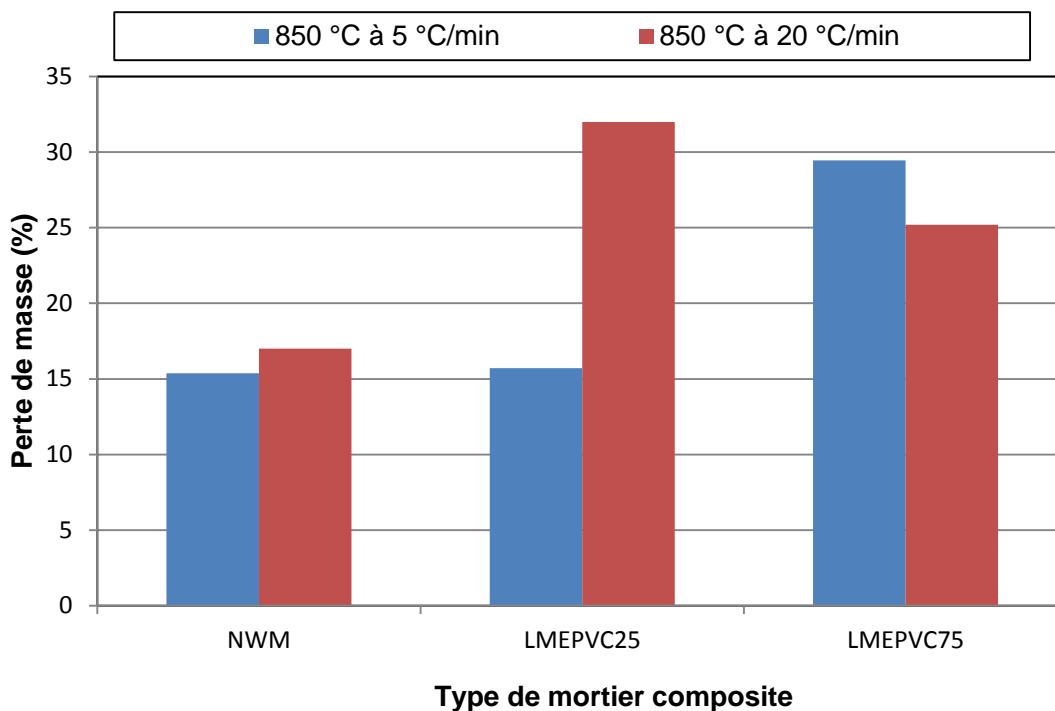
Toutes les caractéristiques thermiques des mortiers légers LMEPVC ont diminué lorsque la chaleur augmente. La structure poreuse peut devenir plus grossière sous l'effet de

l'évaporation de l'eau et la décomposition de la calcite. Cependant, le mortier LMEPVC75 présente des propriétés thermiques inférieures que celles des autres mortiers.

## IV.6. Influence de la vitesse du chauffage sur les propriétés des mortiers LMEPVCs

### IV.6.1. Perte de masse

La figure IV.20 présente les pertes de masse des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 en fonction de la vitesse du chauffage jusqu'à la température de 850°C.



**Figure IV.20 :** Pertes de masse des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 à 850°C pour des vitesses du chauffage de 5°C/min et 20°C/min.

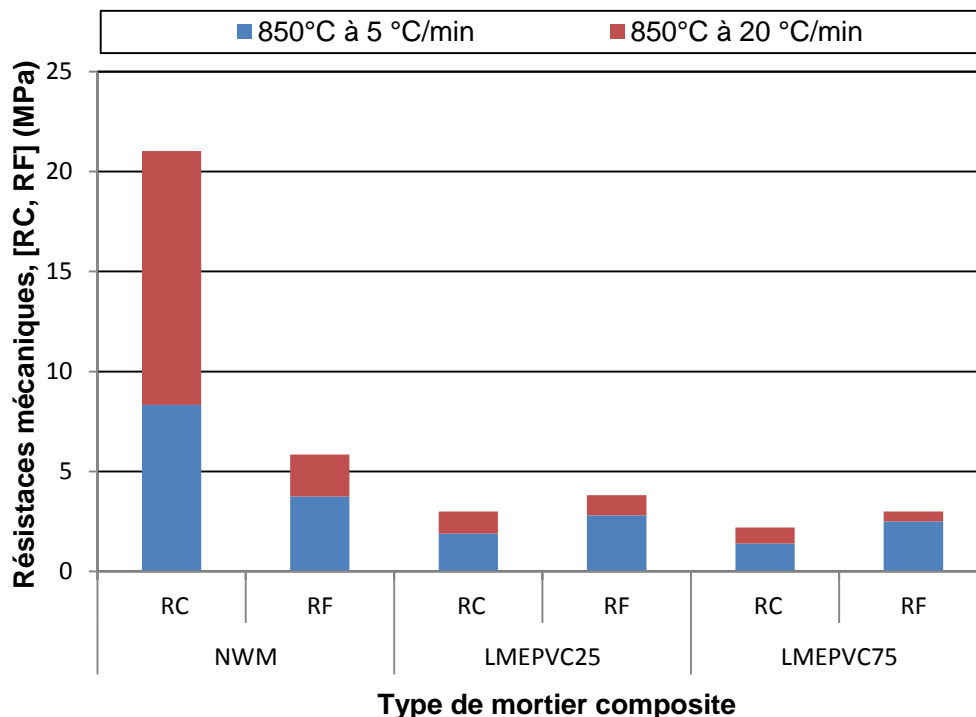
. On observe que la diminution de masse des mortiers NWM et LMEPVC25 est moindre que le mortier LMEPVC75 à la vitesse de 5°C/min. On remarque aussi que le mortier LMEPVC75 présente un comportement différent par rapport aux composites NWM et LMEPVC25 ; il montre une perte de masse beaucoup plus importante pour une vitesse de 5°C/min que pour la vitesse de 20°C/min.

Cette différence de la perte de masse peut être attribuable au pourcentage élevé des agrégats d'EPVC dans les composites LMEPVC75. Cülfik et al. [16] ont remarqué le même effet sous des températures atteignant les 900°C. Les mortiers conservent plus de masse à des températures élevées quand ils sont chauffés rapidement. Ce qui indique que la matrice

cimentaire subie une déshydratation plus avancée à des vitesses rapides bien que le pourcentage élevé des agrégats d'EPVC conserve la masse à ces vitesses.

### IV.6.2. Résistances mécaniques

La figure IV.21 présente les résistances mécaniques (résistance à la compression RC et la résistance à la flexion RF) des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 en fonction de la vitesse du chauffage jusqu'à la température de 850°C.



**Figure IV. 21 :** Les résistances mécaniques des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 en fonction de la vitesse de chauffage à 850°C.

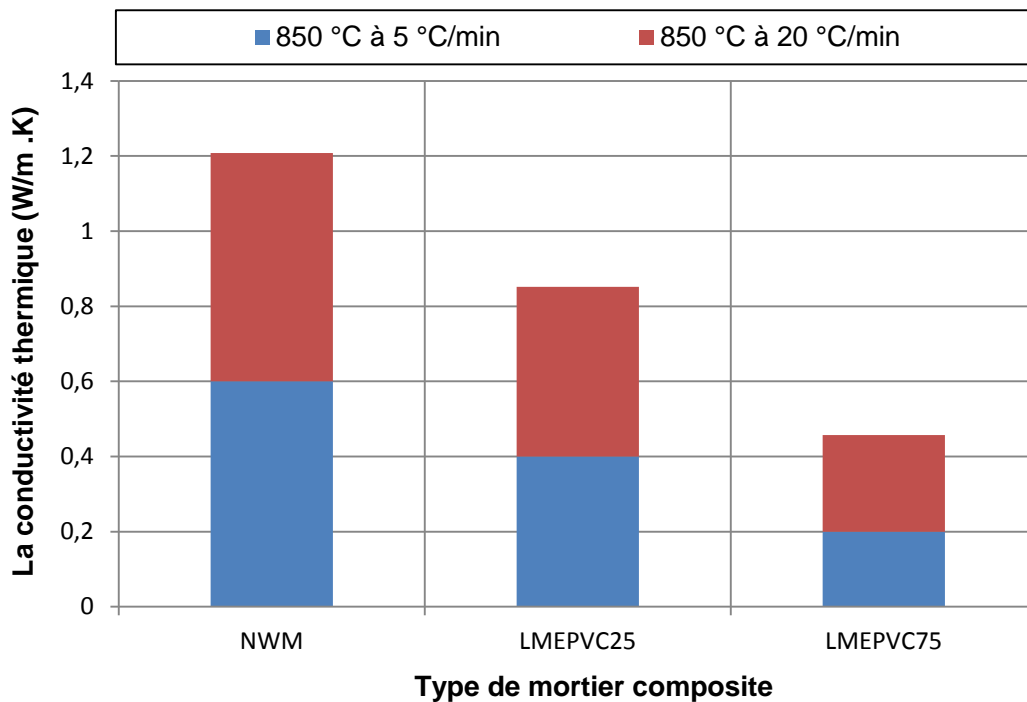
Sauf cas pour le mortier NWM, on peut constater que les résistances mécaniques des mortiers légers LMEPVC sont généralement plus faibles à la vitesse de 20°C/min par rapport à la vitesse de chauffage de 5°C/min, et que cette variation est d'autant plus faible que le pourcentage des agrégats d'EPVC est élevé. Hager [13] met en évidence l'influence de la vitesse du chauffage sur les bétons à base de fibres de polypropylène. Les bétons fibrés sont chauffés à une vitesse plus lente de 0.5°C/min et à 1°C/min. Elle a constaté que les résistances du béton chauffé à 0.5°C/min sont plus faibles que celles du béton chauffé à une vitesse plus rapide de 1°C/min.

L'augmentation de la vitesse du chauffage engendre un endommagement rapide des mortiers composites LMEPVC par la détérioration de la pâte de ciment (déshydratation du gel

de CSH et la décomposition de la calcite) plus importante par rapport aux vitesses lentes, ce qui conduit à une diminution rapide des résistances.

### IV.6.3. Caractérisation des propriétés thermiques

La figure IV.22 présente la conductivité thermique des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 en fonction de la vitesse du chauffage jusqu'à la température de 850°C.



**Figure IV. 22 :** La conductivité thermique des mortiers NWM, LMEPVC25 et LMEPVC75 en fonction de la vitesse de chauffage à 850°C.

On constate que la diminution de la conductivité thermique des mortiers légers LMEPVCs dans les deux vitesses de chauffage est presque similaire. Cela signifie que le chauffage jusqu'à 850°C, soit à une vitesse lente ou rapide, conduit à la détérioration de la microstructure et produit des microfissures limitant, ainsi, les transferts de la chaleur.

Les mesures des caractéristiques thermiques (conductivité, diffusivité et chaleur spécifique) à une température de 850°C et à la vitesse de chauffage de 5°C/min et 20°C/min des mortiers étudiés sont présentées dans le Tableau IV.4.



**Tableau IV.4 :** Propriétés thermiques des mortiers LMEPVCs à température de 850°C et à une vitesse de chauffage de 5°C/min et de 20°C/min.

		NWM	LMEPVC25	LMEPVC75
La conductivité thermique $\lambda$ (W/m.K)	850 °C à 5 °C/min	0,600	0,400	0,200
	850 °C à 20 °C/min	0,608	0,452	0,257
La capacité calorifique Cp (J/m <sup>3</sup> *k)*10 <sup>6</sup>	850 °C à 5 °C/min	1,500	1,400	/
	850 °C à 20 °C/min	1,500	1,410	/
La résistivité thermique a (m <sup>2</sup> /s)*10 <sup>-6</sup>	850°C à 5 °C/min	0,380	0,240	/
	850 °C à 20 °C/min	0,370	0,260	/

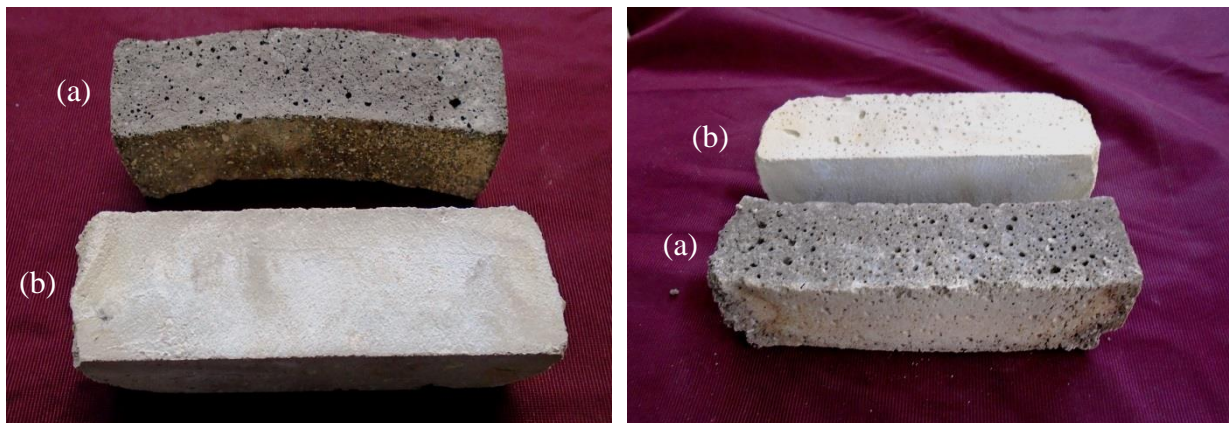
Toutes les caractéristiques thermiques des mortiers légers LMEPVC ont diminué lorsque la chaleur augmente. La diminution des caractéristiques thermiques dans les deux vitesses de chauffage est presque similaire.

Par ailleurs, l'endommagement des échantillons LMEPVC75 était trop avancé pour permettre une mesure fiable de la diffusivité et de la chaleur spécifique dans le cas des deux vitesses du chauffage.

#### IV.6.4. Effet de la vitesse de chauffage sur l'état des éprouvettes

La figure IV.23 présente l'état des éprouvettes des mortiers NWM et LMEPVC75 après le chauffage à 850°C avec des vitesses de 5°C/min et de 20 °C/min.

Plusieurs changements de l'état de forme, surface et de couleur ont été observés visuellement.



(1) 850 °C à 5 °C/min

(2) 850 °C à 20 °C/min

**Figure IV. 23 :** Etat des éprouvettes des mortiers : (a) LMEPVC75 ; (b) NWM à 850°C avec des vitesses de chauffage : (1) 5 °C/min ; (2) 20 °C/min.

On observe une réduction importante du volume des échantillons LMEPVC75 par rapport au mortier NWM. On note, aussi, une couleur qui passait du gris au gris brunâtre pour les mortiers LMEPVC75 et ce pour les deux vitesses du chauffage.

La comparaison qualitative de la géométrie (forme) entre les deux éprouvettes LMEPVC75 à 850°C indique que la courbure de l'éprouvette de LMEPVC75 dans le cas de la vitesse de 5°C/min est beaucoup plus importante que pour le cas de 20 °C/min.

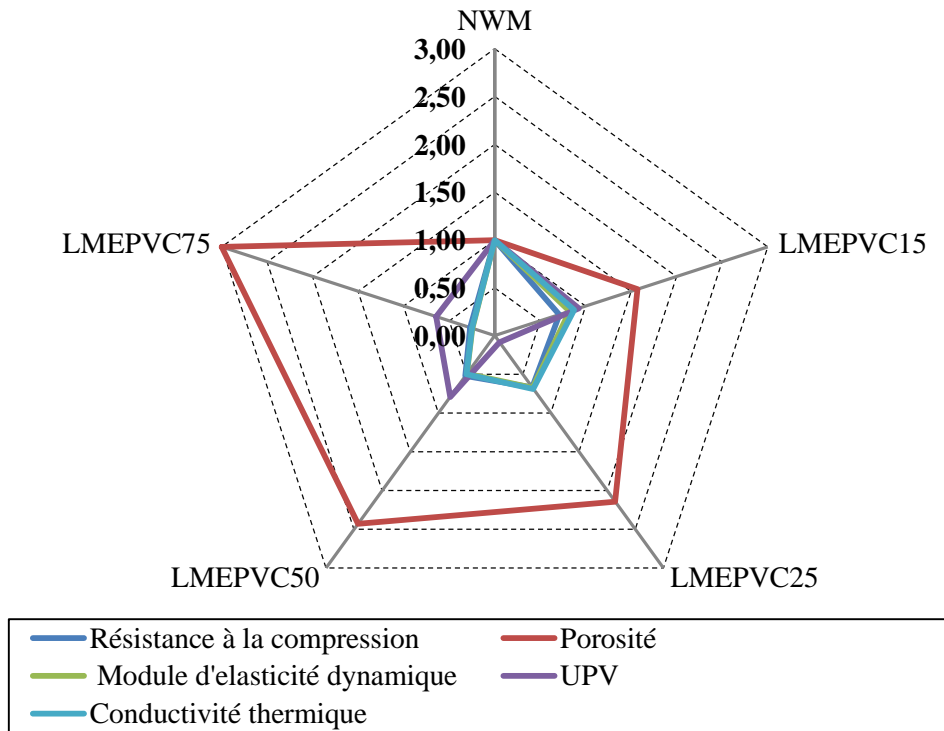
#### **IV.7. Relation entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des LMEPVCs à hautes températures**

Les figures IV.24 et IV.25 montrent l'ensemble des variations des propriétés physico-mécaniques et thermiques des mortiers composites LMEPVC à des températures de 25°C et 650°C.

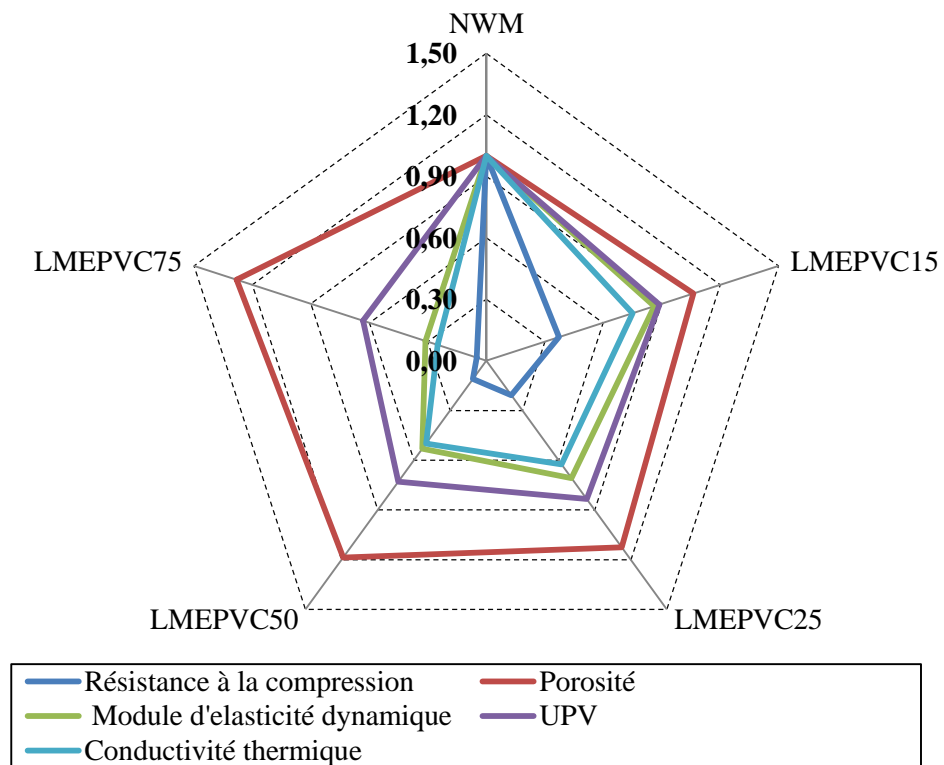
Vue la dégradation avancée des différentes éprouvettes des composites LMEPVC sous très hautes températures (850°C), on s'est limité à la présentation des différents paramètres seulement à 650°C.

On observe une diminution de toutes les propriétés avec l'augmentation de la teneur en agrégats d'EPVC ; sauf, pour le cas de la porosité où elle présente des augmentations significatives par rapport au mortier témoin surtout pour le composite LMEPVC75 à une température de 25°C.

D'après le graphe qui présente les propriétés des composites LMEPVCs à 25°C, on observe que les mortiers composites LMEPVC15 et LMEPVC25 montrent des propriétés proches au mortier NWM. On note aussi une augmentation considérable de la porosité des mortiers composites légers LMEPVC50 et LMEPVC75 par rapport au mortier NWM. A 650°C, on observe une diminution très importante de cette dernière avec une convergence entre les propriétés des composites LMEPVC et celle du mortier NWM.



**Figure IV.24 :** La relation entre les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 25°C.



**Figure IV.25 :** La relation entre les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 650°C.

Les différentes corrélations entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 650°C sont représentées par le tableau IV.5.

**Tableau IV.5:** Corrélations entre les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites LMEPVCs à 650°C.

Paramètres	Equations de corrélation	Coefficients de corrélation
Flexion-compression	$y = -0,0137x^2 + 0,5 x + 1,6951$	$R^2 = 0,9620$
Compression-porosité	$y = -0,0245x^2 - 1.0298,5 x + 41,65$	$R^2 = 0,9711$
Conductivité-compression	$y = 0,1934 \ln(x) + 0,1555$	$R^2 = 0,9948$
Conductivité-porosité	$y = -15,5x + 43.95$	$R^2 = 0,9846$
Conductivité-UPV	$y = 1402x + 1111$	$R^2 = 0,9881$

Comme le montre clairement les corrélations obtenues à 25°C dans le tableau III.3 ; les équations représentées dans le tableau IV.5 indiquent qu'il y a des valeurs élevées pour les coefficients de corrélation  $R^2$  et ceci montre la forte relation qui existe entre les différents paramètres étudiés pour les mortiers composites à base des agrégats légers d'EPVC "LMEPVCs" à 650°C.

#### IV.8. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des propriétés physico-mécaniques et thermiques des différents mortiers composites LMEPVC à la température ambiante et après traitement thermique jusqu'à 450°C, 650°C et 850°C. Sur la base des résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les pertes de masse des mortiers composites LMEPVC sont plus importantes que celles du mortier de contrôle et augmentent progressivement avec le taux d'incorporation des agrégats d'EPVC, et surtout pour les composites LMEPVC50 et LMEPVC75 à 650°C et 850°C ;
- La variation du volume apparent dépend de la température d'exposition et du pourcentage des agrégats d'EPVC inclus dans le mortier léger LMEPVC. Car, plus ce pourcentage augmente, plus la diminution du volume augmente à très hautes températures ;
- La porosité accessible à l'eau augmente avec l'augmentation de la température d'exposition. L'exposition à la température de 650°C provoque une augmentation

- 2 fois plus grande de la porosité pour le mortier NWM par rapport au composite LMEPVC75 ;
- Une diminution des valeurs de l'UPV avec l'augmentation de la température pour toutes les formulations des composites mortier-polymère. L'endommagement des échantillons LMEPVC50 et LMEPVC75 était trop avancé à 850°C pour une mesure de cette propriété.
  - Une diminution du module d'élasticité des LMEPVCs avec l'augmentation de la température. Cette baisse du module d'élasticité résulte de l'endommagement produit par le chauffage. La dégradation des mortiers légers LMEPVC est remarquée dès que la température atteint les 650°C, mais ils restent capables de supporter des températures de plus en plus élevées, jusqu'à ce qu'ils atteignent le même taux de perte de module d'élasticité que le mortier témoin ;
  - La résistance à la compression des composites mortiers légers LMEPVC diminue régulièrement avec l'augmentation de la température et le facteur d'endommagement  $D_i$  du mortier NWM est plus petit que celui des mortiers composites LMEPVC ;
  - Les résultats de la résistance à la flexion sont néanmoins similaires à ceux obtenus pour la résistance à la compression. A 850°C, les mortiers composites LMEPVC50 et LMEPVC75 présentent la plus faible chute de la résistance à la flexion comparée aux autres mortiers, en raison de la plus grande teneur en EPVC ;
  - L'analyse MEB a révélé que l'élévation de la température jusqu'à 850°C transforme complètement la morphologie des composites LMEPVC75. La matrice de ces derniers conduit à la création de nombreux pores et de nombreuses cavités qui impliquent une forte modification des propriétés physico-mécaniques et thermiques ;
  - Les méthodes d'analyses telles que la DRX et l'IRTF ont révélé qu'aucune interaction chimique entre les espèces minérales et l'EPVC n'a pu conduire à la formation de nouveaux composés à 850°C ;
  - Toutes les caractéristiques thermiques des mortiers légers LMEPVC ont diminué lorsque la chaleur augmente. La conductivité thermique des mortiers LMEPVC50 et LMEPVC75 atteint une diminution de 59% et 58% par rapport à la température ambiante, respectivement ;
  - Les mortiers NWM et LMEPVC25 conservent plus de ces propriétés à des températures élevées quand ils sont chauffés rapidement. Le mortier composite

LMEPVC75 présente un comportement différent par rapport au composites NWM et LMEPVC25. Il montre une perte de masse beaucoup plus importante pour une vitesse de 5°C/min que pour la vitesse de 20°C/min ;

- L'augmentation de la vitesse du chauffage engendre un endommagement rapide des mortiers composites LMEPVC par rapport aux vitesses lentes, ce qui conduit à une diminution rapide des résistances mécaniques.
- Toutes les caractéristiques thermiques des mortiers légers LMEPVC ont diminué lorsque la chaleur augmente. La diminution des caractéristiques thermiques dans les deux vitesses de chauffage est presque similaire.
- On observe une réduction importante du volume des échantillons LMEPVC75 par rapport au mortier NWM à 850°C et pour une vitesse de 20°C/min.

On constate que malgré un taux avancé de substitution du sable naturel par des déchets d'EPVC (FOREX) et qu'un chauffage à hautes températures des composites obtenus ; il y a une convergence néanmoins relative entre les propriétés des mortiers LMEPVCs et le mortier de référence NWM. D'où la production des Eco-matériaux de construction verts.

Dans le chapitre V, l'étude de la durabilité des mortiers composites fera l'objet de plusieurs essais. Nous allons donc déterminer l'absorption capillaire (la sorptivité), la porosité et étudier l'influence des agrégats légers de PVC expansé en milieux agressifs riches en ions chlorures.

### Références bibliographiques

- [1] Guelmine L, Hadjab H, Benazzouk A: Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar. *Construction and Building Materials* 2016, 126:77-85.
- [2] Correia J, Lima J, De Brito J: Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites* 2014, 53:187-199.
- [3] Loukili A: Les bétons auto-plaçants. 11, rue Lavoisier, 75008 Paris: Lavoisier; 2010.
- [4] Rahmani E, Dehestani M, Beygi M, Allahyari H, Nikbin I: On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials* 2013, 47:1302-1308.
- [5] Albano C, Camacho N, Hernandez M, Matheus A, Gutierrez A: Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management* 2009,29(10):2707-2716.
- [6] BIS: Indian standard non-destructive testing of concrete-Methods of test. Part 1: Ultrasonic pulse velocity. 1992.
- [7] Ozbakkaloglu T, Gu L, Gholampour A: Short-Term Mechanical Properties of Concrete Containing Recycled Polypropylene Coarse Aggregates under Ambient and Elevated Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2017, 29(10):04017191.
- [8] Nguyen TH: Contribution à l'étude du comportement thermomécanique à très haute température des matériaux composites pour la réparation et/ou le renforcement des structures de Génie Civil. Université Claude Bernard-Lyon I; 2015.
- [9] Awal AA, Shehu I, Ismail M: Effect of cooling regime on the residual performance of high-volume palm oil fuel ash concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials* 2015, 98:875-883.
- [10] Mindeguia J-C: Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons. Université de Pau et des Pays de l'Adour; 2009.
- [11] Badache A: Performances Mécaniques, Thermiques et durabilité des mortiers composites à base des additions minérales et déchets de polymère. Thèse de doctorat, ENP M-A .Oran.2018.
- [12] Lemaitre J, Mazars J, Application de la théorie de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure, AITBTP (Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics), 1982. (No. 401).
- [13] Hager I: Comportement à haute température des bétons à haute performance: évolution des principales propriétés mécaniques. École nationale des ponts et chaussées (France); 2004.
- [14] Fares H: Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée. Université de Cergy Pontoise; 2009.
- [15] Benosman AS, Mouli M, Taibi H, Belbachir M, Senhadji Y, Behlouli I, Houivet D: Mineralogical Study of Polymer-Mortar Composites with PET Polymer by Means of Spectroscopic Analyses. *Materials Sciences and Applications* 2012, 3: 139-150.
- [16] Cülfik M S, Özturan T: Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar. *Cement and Concrete Research* 2002, 32: 809-816.



*Chapitre V*

*Attaque Chimique des Mortiers  
Composites Légers LMEPVC par  
les Ions Chlorures*

## V.1. Introduction

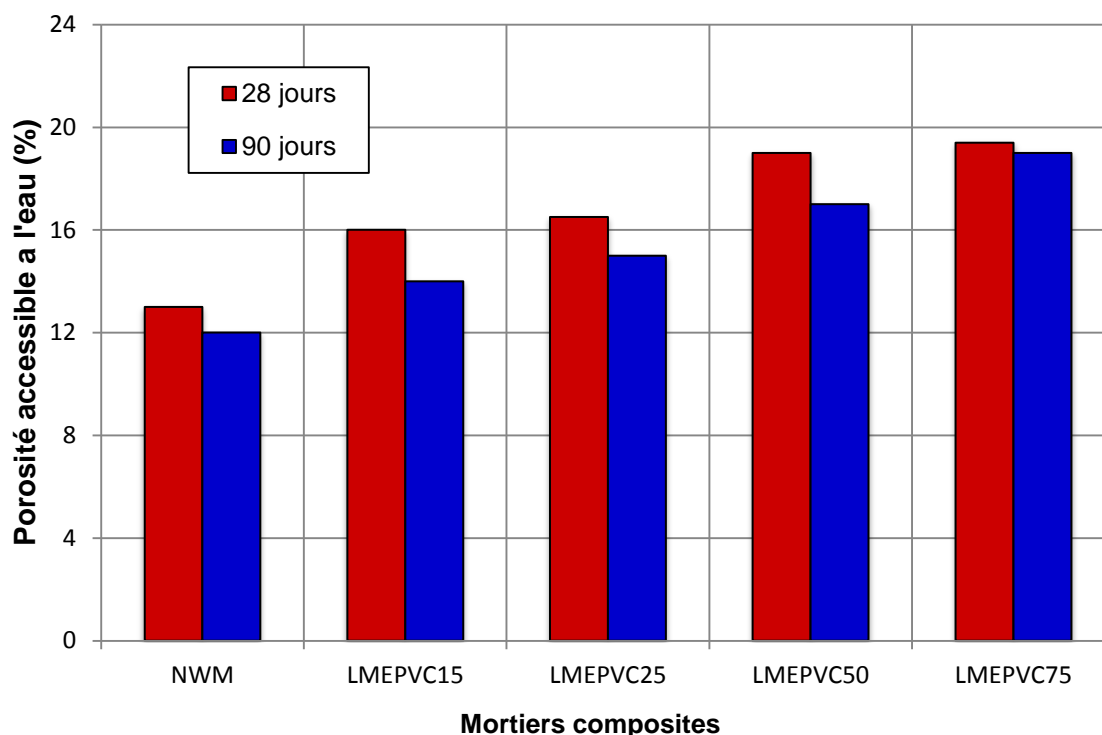
La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour les matériaux cimentaires. La résistance à la pénétration des ions chlorures dans le mortier et le béton est l'une des questions les plus importantes au sujet de la durabilité des structures. Quand la concentration en chlorure du mortier ou du béton dépasse une certaine valeur limite, la dépassement de l'acier se produit et il y a un début de corrosion pour l'acier renforcé [1, 2].

Ce chapitre montre les résultats de la porosité accessible à l'eau, la sorptivité et traite la résistance des mortiers composites LMEPVC contre la pénétration des ions chlorures. L'attaque par les chlorures se distingue par le fait qu'elle entraîne la corrosion des armatures et qu'ensuite, comme conséquence de ce phénomène, le béton environnant est dégradé. La corrosion des armatures est l'une des causes principales de la détérioration des structures en béton armé partout à travers le monde. Dans cette partie on traite la résistance à la pénétration d'ions chlore des composites LMEPVCs en appliquant la deuxième loi de Fick.

Pour mettre en évidence l'influence de l'ajout du polychlorure de vinyle expansé (EPVC) sur le comportement des mortiers composites LMEPVC à la pénétration des ions chlorures, on a effectué une série d'essais chimiques et physiques dans le laboratoire de matériaux LABMAT du département de Génie Civil de l'ENPO-MA d'Oran.

## V.2. Evolution de la porosité des mortiers composites LMEPVC

La porosité est une propriété du matériau cimentaire ayant une incidence immédiate sur les propriétés de diffusion du béton/mortier, et donc, par voie de conséquence sur sa durabilité. Les résultats de la porosité accessible à l'eau des mortiers composites LMEPVCs à 28 et 90 jours sont présentés dans la figureV.1.



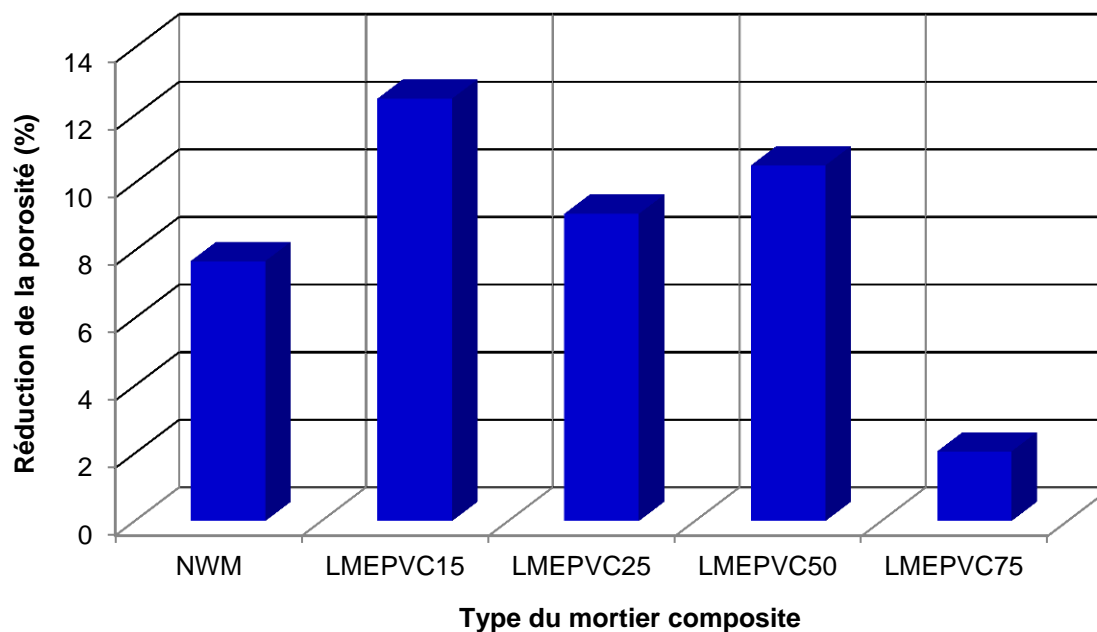
**Figure V.1:** Porosité accessible à l'eau des composites LMEPVCs après 28 et 90 jours de cure.

D'après la figure V.1, les valeurs de la porosité accessible à l'eau du mortier NWM sont plus faibles que celles des mortiers composites contenant différents taux de granulats d'EPVC. La porosité accessible à l'eau des composites LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75 est supérieure de 23, 27, 46 et 49% à 28 jours et de 17, 25, 42 et 58 % à 90 jours par rapport au mortier témoin NWM.

Cependant en comparant les proportions de la diminution de la porosité entre 28 et 90 jours ; on peut remarquer des diminutions plus élevées pour les mortiers incorporant des agrégats d'EPVC par rapport au NWM (sauf, pour les mortiers LMEPVC75). Ceci est mis en évidence grâce à la figure V.2 qui montre clairement la réduction de la porosité de 28 à 90 jours pour chaque type de mortier.

Les évolutions croissantes de la porosité des composites LMEPVC peuvent être attribuées à la modification de l'empilement du squelette granulaire liée à la granulométrie différente des particules d'EPVC par rapport au sable naturel qui peut perturber cet empilement. Généralement, un faible agencement ITZ entre la matrice cimentaire et les agrégats légers est responsable à l'augmentation de la porosité et la diminution des propriétés mécaniques [3,4]. Cela, donne la naissance d'une porosité supplémentaire au niveau de

l'auréole de transition, et qui constitue un chemin à l'eau et aux agents agressifs vers l'intérieur de l'échantillon.



**Figure V.2 :** Taux de la réduction de la porosité des différents mortiers de 28 à 90 jours de cure.

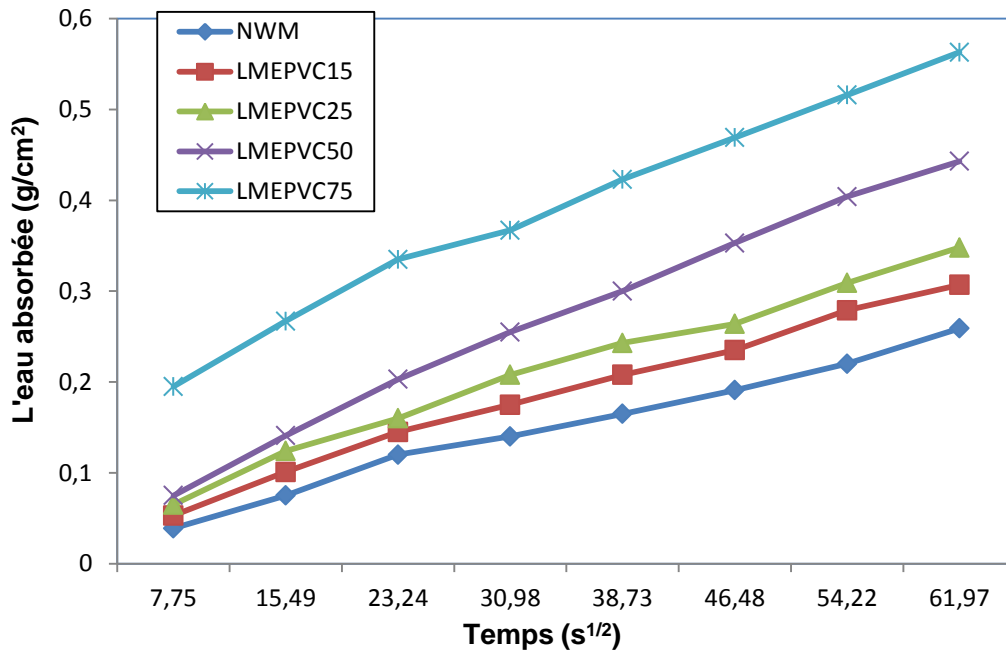
Plusieurs exemples dans le domaine des composites à base des agrégats légers recyclés ont trouvé que la porosité à l'eau des composites légers était plus élevée en comparaison avec un mortier contenant des agrégats naturels [5, 6, 7].

Fraj et al. [5] ont enregistré une valeur plus élevée de la porosité accessible à l'eau du mortier de ciment contenant un agrégat des mousses de polyuréthane (PUR) à celle de mortier ne contenant pas d'agrégat plastique. Akcaozoglu et al. [6] ont trouvé que la porosité était plus élevée pour un mortier de ciment contenant 100% d'agrégat de PET en comparaison avec un mortier témoin.

### V.3. Mesure du coefficient de la sorptivité des composites LMEPVCs

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. Plus la sorptivité est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

Les résultats de l'essai de la sorptivité des différents mortiers composites LMEPVC, à 28 jours, sont présentés en traçant toutes les droites des segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps comme illustrée dans la figure V.3.

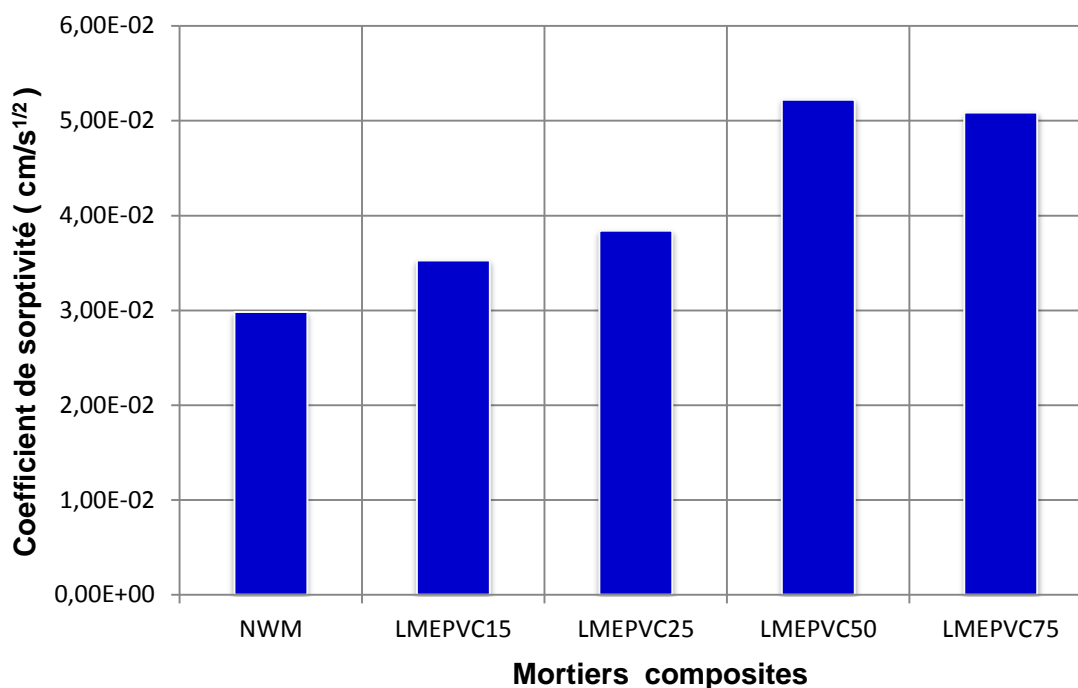


**Figure V.3 :** L'absorption d'eau par unité de surface des mortiers composites LMEPVC à 28 jours.

La figure V.3 montre la relation entre l'absorption d'eau cumulative des mortiers composites LMEPVC et la racine carrée du temps d'écoulement. Il est important de noter que la plus grande valeur d'absorption d'eau par capillarité est de 0,536 g/cm<sup>2</sup>; il a été observé dans le mélange de mortier LMEPVC75. L'incorporation des granulats d'EPVC augmente l'absorption d'eau par capillarité.

La figure V.4 montre l'influence de l'incorporation de l'agrégat d'EPVC sur le coefficient de la sorptivité des mortiers composites LMEPVC. Le coefficient de la sorptivité a considérablement augmenté avec la substitution de l'agrégat naturel par l'agrégat d'EPVC.

Les mortiers composites LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75 ont enregistré une augmentation du coefficient de sorptivité par rapport au mortier NWM de l'ordre de 18%, 28%, 75% et 70%, respectivement.



**Figure V.4:** Le coefficient d'absorption capillaire des mortiers composites LMEPVC à 28 jours.

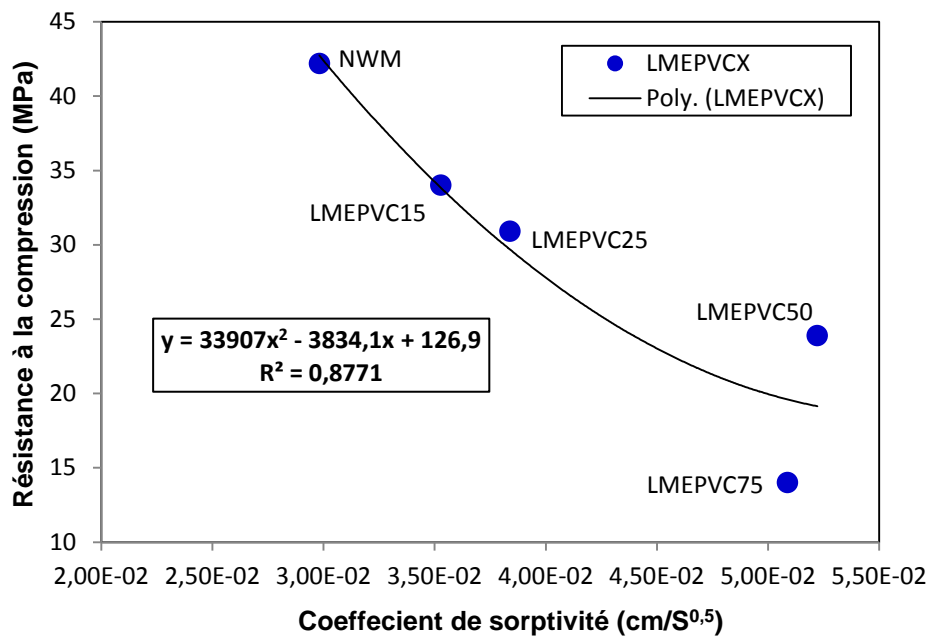
A partir de ces résultats, on peut conclure que la substitution des agrégats naturels par l'agrégat léger d'EPVC augmente l'absorption capillaire des mortiers. Les résultats obtenus concordent avec ceux trouvés par certains auteurs [7, 8, 9].

L'augmentation de l'absorption capillaire des mortiers LMEPVC est due principalement à l'augmentation des macropores au niveau de l'ITZ (EPVC/matrice cimentaire) (Figure III.14). En outre, ceci peut être expliqué, aussi, par la granulométrie des agrégats d'EPVC qui est pauvre en éléments fins.

La relation entre la résistance à la compression et le coefficient de sorptivité des mortiers composites est illustrée par la figure V.5. Il est possible de maintenir une relation polynomiale entre la sorptivité et la résistance à la compression avec un coefficient de corrélation d'environ  $R^2 = 0,8771$ . On peut noter qu'une augmentation dans le coefficient de sorptivité est associée à une diminution de la résistance à la compression des mortiers composites LMEPVC. Contrairement à la résistance à la compression, la valeur la plus élevée du coefficient de sorptivité a été mesurée pour les composites LMEPVC50 et LMEPVC75.

Gouasmi et al. [10] ont étudié la relation entre la résistance mécanique et la sorptivité des mortiers composites à base des agrégats légers WPLA. Ils ont constaté une relation

polynomiale entre la sorptivité et la résistance à la compression avec un coefficient de corrélation d'environ  $R^2 = 0,7577$ .



**Figure V.5:** Le coefficient de sorptivité en fonction de la résistance à la compression à 28 jours des mortiers composites LMEPVC.

#### V.4. Test de la pénétration d'ions chlorures - l'essai d'immersion totale -

La résistance à la pénétration des ions chlorures a été déterminée selon les normes UNI 7928 [11]. Les éprouvettes traitées ont été immergées dans des solutions d'essai à 20°C pendant 7, 28 et 91 jours pour la pénétration des ions chlorures.

Le tableau V.1 illustre la profondeur de la pénétration des ions chlorures (Cl<sup>-</sup>) des mortiers légers LMEPVC immergés dans 5 % de solution de NaCl pendant 7, 28 et 91 jours.

**Tableau V.1 :** La profondeur de la pénétration des ions Cl<sup>-</sup> après 7, 28 et 91 jours de l'immersion des mortiers LMEPVC dans 5% en NaCl.

	NWM (mm)	LMEPVC15 (mm)	LMEPVC25 (mm)	LMEPVC50 (mm)	LMEPVC75 (mm)
7 jours	8,64	10,55	12,35	13,55	14,68
28 jours	13,51	15,43	16,29	18,10	18,57
91 jours	20,73	20,75	22,22	22,89	23,38

Généralement la profondeur de la pénétration des ions Cl<sup>-</sup> dans les mortiers composites LMEPVC augmente avec la période de l'immersion. On note aussi que cette



profondeur augmente également avec l'augmentation de la teneur en agrégats d'EPVC ainsi qu'à la durée du durcissement. Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par Badache [7].

D'après Gané [12] et Siad et al. [13], les ions chlorures en tant que solution sont d'abord « aspirés » dans les pores avec l'eau absorbée. Au-delà de la zone d'absorption, la pénétration du chlorure se fait par diffusion.

La pénétration des ions chlorures est influencée par la porosité et la sorptivité des mortiers LMEPVCs. Car une structure plus ouverte permet d'entraîner des ions chlorures à une grande profondeur de pénétration.

Il est insuffisant d'étudier seulement la sorptivité comme un indicateur de la durabilité des composites LMEPVCs contre les attaques par les chlorures. Il est nécessaire de rejoindre plusieurs tests tels que la porosité au mercure et la détermination quantitative chimique de la profondeur des ions Cl<sup>-</sup>.

Les ions Cl<sup>-</sup> qui diffusent dans le milieu poreux des mortiers composites LMEPVC modifient l'équilibre thermodynamique du système solution interstitielle/phase solide. Ils rendent la solution interstitielle acide qui provoque la dissolution de la portlandite, puis la décalcification progressive des C-S-H [14]. De même, ces réactions chimiques, peuvent entraîner la formation de composés expansifs comme le trisulfoaluminate de calcium qui peut éventuellement causer des gonflements et de la fissuration à l'intérieur de la structure de béton [15].

Pour mieux estimer le taux de la pénétration des ions chlorures, il est nécessaire de calculer le coefficient apparent de la diffusion en appliquant la deuxième loi de Fick.

### ➤ Application de la deuxième loi de Fick de la diffusion des ions chlorures

Les coefficients de la diffusion et les teneurs en chlorures des surfaces des éprouvettes des mortier/béton ont été déterminés par l'ajustement de la courbe non linéaire des ions chlorures de la deuxième loi de Fick selon l'expression suivante (Eq. V.1) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_C \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{Eq. V.1}).$$

La profondeur de pénétration d'ion chlorure suit la deuxième loi de Fick [16] sous les conditions du régime non stationnaire de diffusion. La solution selon cette loi est donnée par l'équation suivante :

$$C(x,t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (\text{Eq. V.2}).$$

Où

**x** : est la distance de pénétration sur la surface des mortiers ou bétons (m),

**t** : est le temps (s),

**D<sub>c</sub>** : est le coefficient de la diffusion (m<sup>2</sup>/s),

**C<sub>0</sub>** : est la concentration en chlorure sur la surface du mortier ou béton,

**C(x, t)** : est la concentration en chlorure à la profondeur de x au temps t,

**erf** : est la fonction d'erreur.

Une approximation de la formule (V.2) est donnée par l'expression suivante [17] :

$$x = 4\sqrt{D t} \quad (\text{Eq. V.3}).$$

Les exemples des rapports entre la période d'immersion et la profondeur de pénétration des ions chlorures des composites LMEPVC sont illustrés dans la figure V.6. Généralement la profondeur de pénétration des ions chlorures des matériaux composites LMEPVCs augmente avec la période d'immersion.

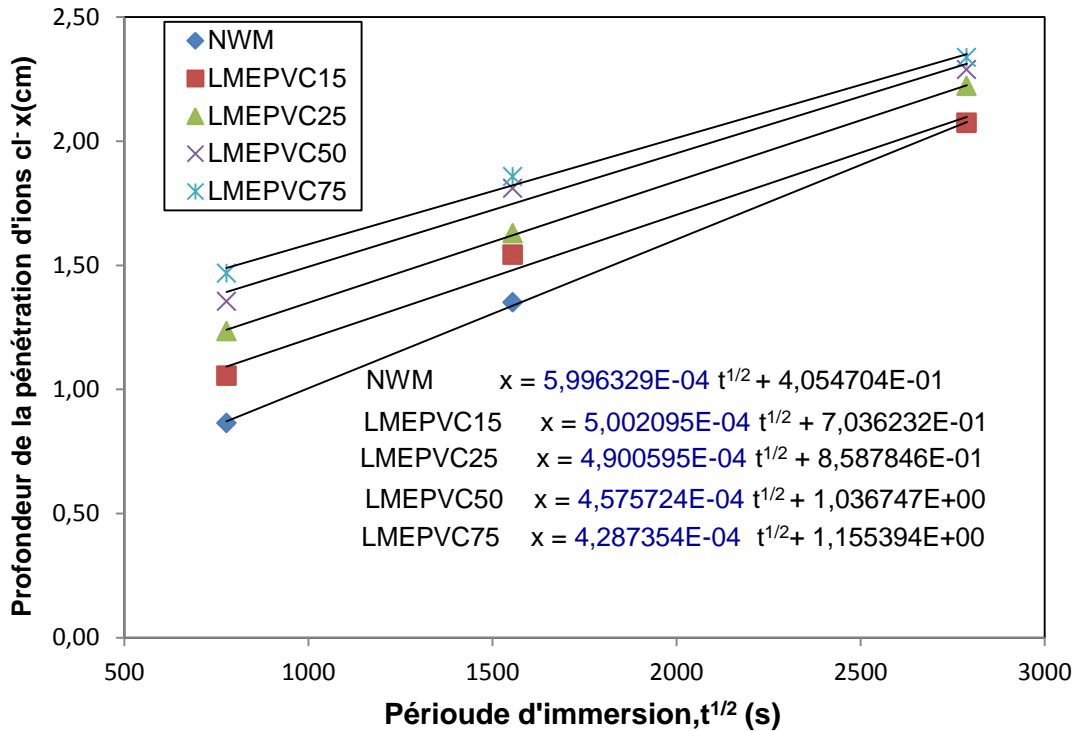
Dans la figure V.6, les graphes  $X = f(\sqrt{t})$  ont des interceptions négatives sur l'axe  $\sqrt{t}$  suivant les types des composites LMEPVC. Ceci signifie que les graphes  $X = f(\sqrt{t})$  ne suivent pas la deuxième loi de Fick's en raison de la réaction des ions chlorures avec certains hydrates de ciment. Les ions chlorures peuvent être trouvés par la réaction dans les différents états suivants: chlorure liés, chimiquement combiné avec C-A-H sous la forme, par exemple, du  $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ ; chlorure liés, adsorbé sur le gel C-S-H ou ions chlorure libres (externes) [18]. Goto et al. [19-20] ont rapporté que la diffusion des ions chlorures dans la matrice cimentaire durci est également accompagnée d'une réaction chimique. Par conséquent, l'équation suivante peut être recommandée pour l'évaluation du coefficient apparent de la diffusion des ions chlorures [20] :

$$x = 4\sqrt{D_a t} + k \quad (\text{Eq. V.4}).$$

Où  $D_a$  : est le coefficient apparent de la diffusion des ions chlorures, calculé à partir des pentes des graphes  $X = f(\sqrt{t})$ ,

$K$  : est la constante empirique.

Les équations empiriques basées sur l'équation (V.4) sont montrées dans la figure V.6.



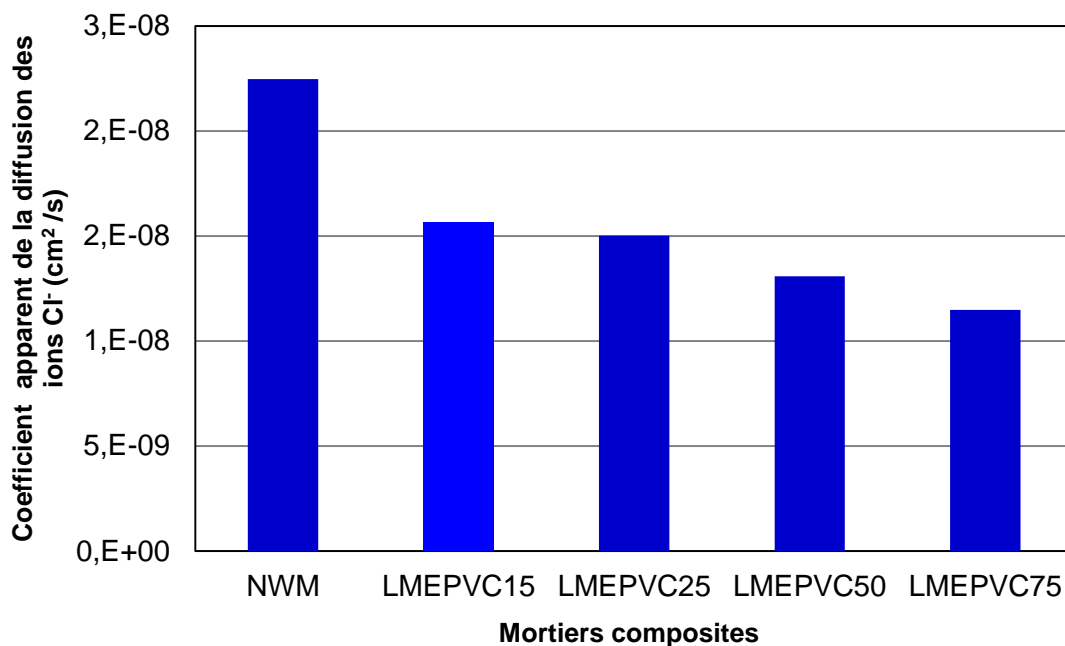
**Figure V.6 :** La profondeur de la pénétration des ions  $Cl^-$  en fonction de la période d'immersion dans 5% en NaCl des composites LMEPVCs.

## V.5. Coefficients de diffusion apparents des ions chlorures

Le coefficient apparent de chaque composite a été obtenu à partir des pentes des graphes  $x = f(\sqrt{t})$ , Figure V.7. On constate que les coefficients apparents de la diffusion des ions chlorures des mortiers contenant l'agrégat d'EPVC chutent considérablement par rapport au NWM dès la première substitution en atteignant 30 % pour LMEPVC15. Quant-au composite LMEPVC75 la chute est beaucoup plus importante, elle est de 49 % par rapport au mortier NWM.

D'une façon générale, le coefficient de la diffusion apparent tend à diminuer avec la teneur en agrégat d'EPVC ; plus cette dernière augmente, plus le coefficient de diffusion apparent tend à diminuer. Il reste évident au vue des données obtenues que la résistance à la pénétration des ions chlorures des mortiers légers soit largement supérieure au mortier témoin

NWM. L'effet de la présence d'EPVC dans les mortiers composites légers LMEPVC joue un rôle primordial dans la diminution de la diffusion des agents agressifs tels que les ions  $Cl^-$ .

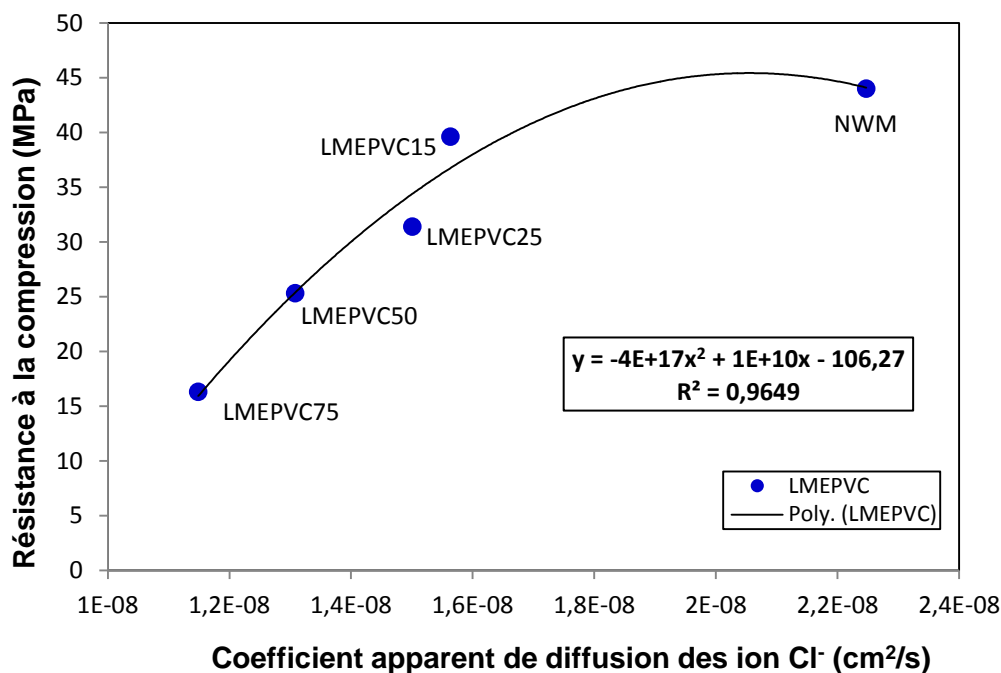


**Figure V.7 :** Relation entre le coefficient apparent de la diffusion des ions  $Cl^-$  et le type des mortiers composites.

Fraj et al. [4] ont évalué que l'ajout des agrégats de la mousse du polyuréthane PUR sec dans la mixture du béton donnait une valeur du coefficient de diffusion d'ion chlore inférieur à la référence. Benosman et al. [21], ont constaté que la substitution du ciment par les particules de déchets en PET diminuait la pénétration rapide d'ions chlores (RCPT). Ghernouti et al. [22], ont remarqué que la substitution du sable concassé par les déchets des sacs plastiques (PEBD) diminuait la profondeur de la pénétration des ions chlore. Gouasmi et al. [10] ont constaté que la substitution partielle de 25, 50, 75 & 100% de l'agrégat naturel par les granulas de WPLA, diminuait le coefficient de diffusion d'ion chlore. Badache [7] a observé une augmentation de la résistance des mortiers composites légers à base de PEHD contre la pénétration des ions chlores. Le composite LWCM60 présente une diminution de  $D_a$  de 47% par rapport au mortier de référence. Cette résistance peut être attribuée à l'imperméabilité des granulats de PEHD qui bloque le passage de l'ion chlorure.

A partir de ces résultats on peut déduire que les mortiers contenant l'agrégat légers d'EPVC peuvent être utilisés pour la protection des ouvrages structurels contenant des armatures. L'interaction entre les surfaces des pores du ciment hydraté et les ions chlorures peuvent être responsables à la diminution du taux de la diffusion.

La relation entre la résistance à la compression et les coefficients de diffusion apparents des ions chlorures des mortiers composites LMEPVC est illustrée par la figure V.8. Une corrélation polynomiale a été trouvée entre la résistance à la compression et la diffusion apparente des ions chlorures avec un bon coefficient de corrélation d'environ  $R^2 = 0,9649$ . On note que le coefficient de diffusion diminue à mesure qu'il y a une diminution de la résistance à la compression. Ceci peut être attribué aux déchets légers des granulats composites d'EPVC qui empêchent le transfert des ions chlorures. Des résultats similaires ont été trouvés par Gouasmi et al. [10].



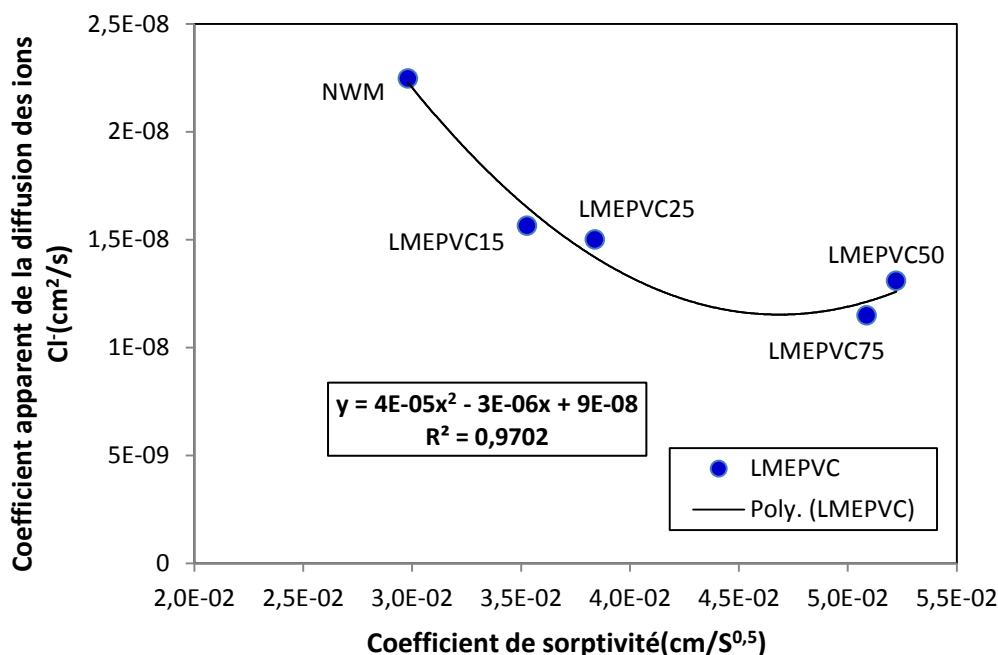
**Figure V.8:** La résistance à la compression en fonction du coefficient de diffusion apparent des ions Cl<sup>-</sup> des mortiers composites LMEPVC.

La relation entre la sorptivité et le coefficient de diffusion apparent des ions chlorures des mortiers composites LMEPVC est illustrée par la figure V.9. Une bonne corrélation polynomiale a été trouvée entre la sorptivité et la diffusion apparente des ions chlorures avec un bon coefficient de corrélation de  $R^2 = 0,9702$ . Gouasmi et al. [10] ont trouvé les mêmes résultats concernant la corrélation et son coefficient  $R^2$  entre ces deux paramètres.

En conséquence, l'application de la 2<sup>ème</sup> loi de Fick reste néanmoins insuffisante pour l'évaluation de la pénétration des ions Cl<sup>-</sup> au sein des mortiers composites LMEPVC. Il est donc nécessaire d'étudier d'autres tests tels que :

- Etude de la distribution des pores par l'essai de la porosité au mercure ;

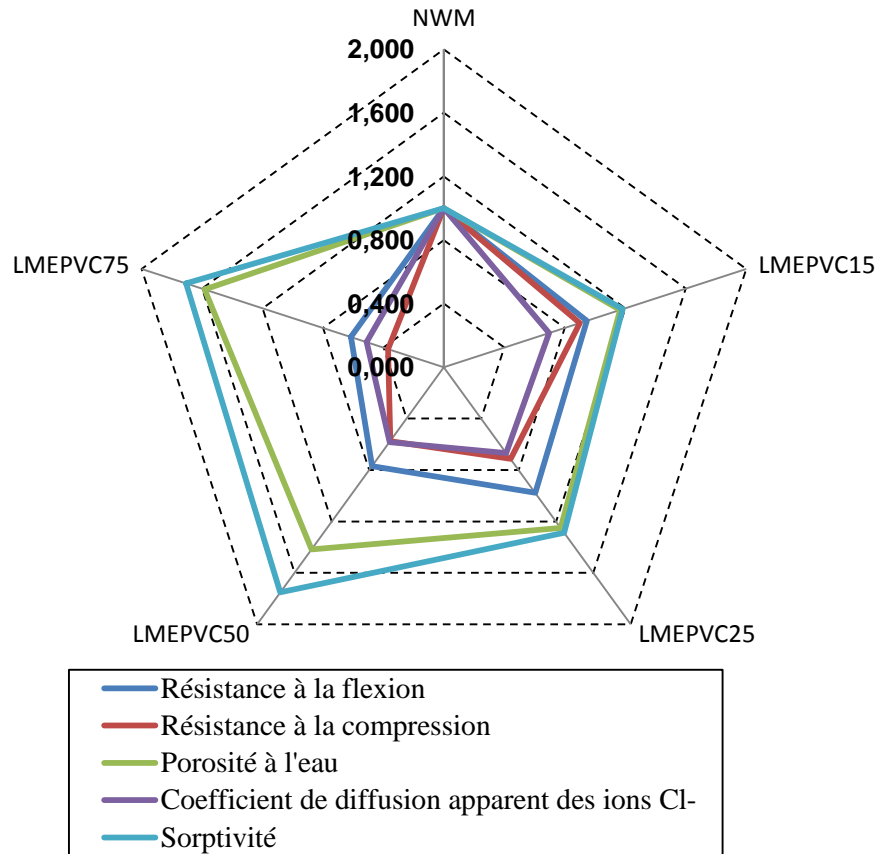
- Etude des propriétés de transfert ;
- L'essai de pénétration rapide d'ions chlore (Rapid Chloride Penetration Test, RCPT) ;
- La détermination quantitative chimique de la profondeur des ions  $\text{Cl}^-$  en fonction de l'âge d'immersion.



**Figure V.9:** Le coefficient de diffusion apparent des ions  $\text{Cl}^-$  en fonction du coefficient de sorptivité des mortiers composite LMEPVC.

## V.6. Relation entre les différents paramètres des composites LMEPVC

La figure V.10 représente la relation entre la durabilité et la résistance mécanique des mortiers composites LMEPVC. On note que plus le pourcentage de substitution augmente plus il y a une diminution des propriétés mécaniques. Le coefficient de la diffusion des chlorures confirme une amélioration significative de la durabilité des mortiers légers en présence des déchets en EPVC.



**Figure V.10:** relation entre les différentes propriétés des mortiers légers LMEPVC.

## V.7. Conclusion

A partir des résultats obtenus, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- L'étude du comportement hydraulique a révélé que l'incorporation des agrégats d'EPVC augmente la sensibilité des composites LMEPVC à l'eau. En général, la sorptivité et la porosité augmentent avec le taux de substitution en volume des agrégats d'EPVC ;
- Une augmentation de la résistance des mortiers composites légers à base d'EPVC à la pénétration des ions chlore. Le composite LMEPVC75 présente une diminution du coefficient  $D_a$  de 49 % par rapport au mortier NWM. Ainsi, la réduction de la pénétration des ions  $Cl^-$  dans les mortiers composites légers réduit au futur le potentiel de la corrosion des structures renforcées, ce qui est de grande importance pratique ;
- Une corrélation polynomiale a été remarquée entre la sorptivité et la résistance à la compression avec un coefficient de corrélation d'environ  $R^2 = 0,8771$ . On peut noter



qu'une augmentation dans le coefficient de sorptivité est associée à une diminution de la résistance à la compression des mortiers composites LMEPVC ;

- Une bonne corrélation a été trouvée entre la résistance à la compression et la diffusion apparente des ions chlorures. Le coefficient de diffusion diminue à mesure que la résistance à la compression diminue. Les déchets légers de granulats composites d'EPVC empêchent le transfert des ions chlorures par diffusion (application de la 2<sup>ème</sup> loi de Fick) ;
- L'étude de la corrélation entre la sorptivité et le coefficient de diffusion apparent des ions chlorures a révélé qu'il est insuffisant d'étudier seulement la sorptivité comme un indicateur de la durabilité des composites LMEPVCs contre les attaques par les chlorures. Il est nécessaire de rejoindre plusieurs tests tels que la porosité au mercure et la détermination quantitative chimique de la profondeur des ions Cl<sup>-</sup>.

A partir de ces résultats on peut déduire que les mortiers LMEPVC contenant des agrégats légers de polychlorure de vinyle (Forex) résistent mieux aux effets nocifs des sels riches en ions chlorures (environnement salin, mers, nappes,...etc.).

### Références bibliographiques

- [1] Adam Neville M : Propriétés des Bétons. Paris: Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles. 2000.
- [2] Raharinaivo A, Arliguie G, Chaussadent T, Grimaldi G, Pollet V, Taché G : La corrosion et la protection des aciers dans le béton. Ed. Marne-la-Vallée: Presse de l'école nationale des ponts et chaussées (ENPC).1998.
- [3] Hannawi K: Conception, caractérisation physico-mécanique et durabilité de nouveaux matériaux de construction à caractère environnemental: application dans la technologie des constructions. Rennes, INSA; 2011.
- [4] Saikia N, de Brito J: Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and building materials* 2014, 52:236-244.
- [5] Fraj AB, Kismi M, Mounanga P: Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 2010, 24(6):1069-1077.
- [6] Akçaözöğlü S, Atiş CD, Akçaözöğlü K: An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste management* 2010, 30(2):285-290.
- [7] Badache A: Performances Mécaniques, Thermiques et durabilité des mortiers composites à base des additions minérales et déchets de polymère. Thèse de doctorat, ENP M-A .Oran.2018.
- [8] Albano C, Camacho N, Hernandez M, Matheus A, Gutierrez A: Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management* 2009,29(10):2707-2716.
- [9] Corinaldesi V, Donnini J, Nardinocchi A: Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials* 2015, 94:337-345.
- [10] Gouasmi MT, Benosman AS, Taïbi H: Improving the properties of waste plastic lightweight aggregates-based composite mortars in an experimental saline environment. *Asian Journal of Civil Engineering* 2018. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0089-1>.
- [11] 79287 U: Concrete-determination of the ion chloride penetration. In. Milano, piazza A. Diaz, 2.:UNI-Ente Nazionale Italiano Di Unificazione,; 1978.
- [12] Gané R: Durabilité et réparations du béton GCI-714. *cours de béton, Université de Sherbrooke*2002.
- [13] Siad H, Mesbah HA, Mouli M, Escadeillas G, Khelafi H: Influence of mineral admixtures on the permeation properties of self-compacting concrete at different ages. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2014, 39(5):3641-3649.
- [14] Touil B: Etude de la diffusion des chlorures dans les betons locaux. mémoire de magister.2009.
- [15] Regourd M, Hornain H, Mortueux B: Microstructure of concrete in aggressive environments durability of building material an components. *American Society for Testing Materials*1980, 253-268.
- [16] Crank J: The mathematics of diffusion: Oxford university press; 1979.
- [17] Collepardi M, Marcialis A, Turriziani R: The penetration of de-icing agents in cement pastes. *Ind Ital Cem* 1972, 69:143-150.
- [18] Nilsson L, Poulsen E, Sandberg P, Sørensen H, Klinghoffer O: HETEK, Chloride penetration into concrete, state-of-the-art, transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models. *Denmark, ISSN/ISBN* 1996:0909-4288.
- [19] Goto S, Roy DM: Diffusion of ions through hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research* 1981, 11(5-6):751-757.
- [20] Goto S, Tsunetani M, Yanagida H, Kondo R: Diffusion of chloride ion in hardened cement paste.*Yogyo Kyokaiishi* 1979, 87(3):126-133.

- [21] Benosman A, Mouli M, Taibi H, Belbachir M, Senhadji Y: Resistance of polymer (PET)-mortar composites to aggressive solutions. In: *International Journal of Engineering Research in Africa: 2011*: Trans Tech Publ; 2011: 1-15.
- [22] Ghernouti Y, Rabehi B: Strength and durability of mortar made with plastics bag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials* 2012, 6(3):145-153.



*Conclusion générale et  
perspectives*

### Conclusion générale et Perspectives

L'objectif principal de cette étude est la gestion des déchets des plaques en PVC expansé "EPVC" pour la réalisation de nouveaux mélanges de mortiers composites légers noté LMEPVC. Il présente, ainsi, un moyen intéressant pour la valorisation de ces déchets dans le domaine du Génie Civil. Les principales conclusions qui peuvent être tirées de ce travail de recherche sont:

- L'ajout d'agrégats d'EPVC comme remplacement partiel en volume du sable contribue à réduire le poids spécifique des composites LMEPVC par rapport au mortier témoin. Les valeurs de la densité des composites LMEPVC tendent à diminuer de 9% et 37% pour les composites LMEPVC15 et LMEPVC75, respectivement. Ceci est utile dans les applications nécessitant des matériaux légers.

- L'augmentation du pourcentage d'EPVC a un effet direct sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers composites ; plus ce pourcentage augmente, plus ces résistances chutent. Les résultats montrent une ductilité amplifiée par l'augmentation du pourcentage de substitution en EPVC. Ce qui est très intéressant pour plusieurs applications en Génie Civil, telles que les structures soumises à des effets dynamiques ou d'impact.

- Les valeurs de l'UPV des LMEPVCs diminuent avec l'augmentation du pourcentage de la teneur en particules de l'EPVC. Ainsi, l'incorporation des particules d'EPVC dans la matrice cimentaire révèle la capacité des composites à la fois de réduire l'intensité sonore et d'amortir les vibrations, ce qui permet de fournir un niveau de fiabilité de l'isolation acoustique. Au fur et à mesure que la vitesse de propagation de l'onde sonore augmente, la résistance à la compression des composites suit cette évolution.

- Les agrégats d'EPVC réduit le module d'élasticité dynamique et augmente la porosité des composites LMEPVCs. On note une diminution de la valeur du module  $E_d$  d'environ 19, 30, 46 et 66% pour les composites LMEPVC15, LMEPVC25, LMEPVC50 et LMEPVC75 par rapport au mortier de référence NWM, respectivement. Cette réduction peut être considérée comme potentiellement intéressante pour certaines applications telles que les trottoirs. L'analyse MEB a montré une faible liaison d'adhérence « ITZ » entre l'agrégat d'EPVC et la matrice cimentaire comparée à celle entre l'agrégat naturel et cette dernière.

- Les particules d'EPVC ont une conductivité thermique significativement plus faible que l'agrégat naturel et la matrice cimentaire qui sont utilisés dans la formulation des mortiers. Ce qui permet une diminution d'environ 60% en conductivité pour le LMEPVC75 par rapport au mortier témoin NWM. Donc, le mortier composite LMEPVC75 ( $\lambda=0.76$

## Conclusion générale et perspectives

---

W/m.K) peut être classé comme un matériau isolant selon la norme RILEM LC2-1978. Ainsi, les composites contenant de l'EPVC ont des propriétés d'isolation thermique meilleure que ceux du mortier non modifié. Ils pourraient fournir de multiples applications, en particulier pour empêcher le transfert de chaleur et pour économiser de l'énergie.

Après l'étude des caractéristiques des mortiers légers LMEPVC à température ambiante, on s'intéresse par ce qui suit au comportement de ces derniers sous hautes températures : 450°C, 650°C et 850°C. D'où :

- La perte de masse des mortiers légers LMEPVC est deux fois plus importante que celle du mortier témoin après chauffage à 850°C ;
- Aucun changement n'est observé dans le volume des éprouvettes des mortiers jusqu'à la température de 450°C. À 850°C, le volume des mortiers composites LMEPVC75 a baissé de 19%. Par ailleurs, le volume des mortiers LMEPVC25 et LMEPVC50 atteint une diminution de 11 % et 16 % par rapport à la température ambiante, respectivement. La variation de volume dépend des pourcentages des agrégats d'EPVC dans le mortier ; car plus le pourcentage augmente, la diminution du volume augmente ;
- Une diminution du module d'élasticité des LMEPVCs avec l'augmentation de la température. Cette baisse du module d'élasticité résulte de l'endommagement produit par le chauffage. La dégradation des mortiers légers LMEPVC est remarquée dès que la température atteint les 650°C, mais ils restent capables de supporter des températures de plus en plus élevées, jusqu'à ce qu'ils atteignent le même taux de perte de module d'élasticité que le mortier témoin ;
- Les mortiers NWM et LMEPVC25 conservent plus de ces propriétés à des températures élevées quand ils sont chauffés rapidement. Le mortier composite LMEPVC75 présente un comportement différent par rapport au composites NWM et LMEPVC25. Il montre une perte de masse beaucoup plus importante pour une vitesse de 5°C/min que pour la vitesse de 20°C/min ;
- L'augmentation de la vitesse du chauffage engendre un endommagement rapide des mortiers composites LMEPVC par rapport aux vitesses lentes, ce qui conduit à une diminution rapide des résistances mécaniques.
- Toutes les caractéristiques thermiques des mortiers légers LMEPVC ont diminué lorsque la chaleur augmente. La diminution des caractéristiques thermiques dans les deux vitesses de chauffage est presque similaire.
- On constate que malgré un taux avancé de substitution du sable naturel par des déchets d'EPVC (Forex) et qu'un chauffage à hautes températures des composites obtenus ; il

## Conclusion générale et perspectives

---

Il y a une convergence néanmoins relative entre les propriétés des mortiers LMEPVCs et le mortier de référence NWM. Le mortier léger LMEPVC75 garde sa forme extérieure jusqu'à une température 850°C.

- Les méthodes d'analyses telles que la DRX et l'IRTF ont révélé qu'aucune interaction chimique entre les espèces minérales et l'EPVC n'a pu conduire à la formation de nouveaux composés à 25°C et à 850°C ;

L'étude de la durabilité a permis de montrer que les agrégats légers d'EPVC à un effet supplémentaire sur le comportement des matériaux composites. En général, les mortiers composites contenant d'agrégats d'EPVC développent une résistance différente à celle du mortier témoin contre l'absorption à l'eau et l'attaque chimique par les ions chlorures (Cl<sup>-</sup>) :

- L'étude du comportement hydraulique a révélé que l'incorporation des particules d'EPVC augmente la sensibilité du mortier composite à l'eau. La sorptivité et la porosité augmentent avec le taux de substitution en volume des agrégats d'EPVC ;

- Le coefficient de diffusion apparent des ions chlorures des LMEPVCs tend à diminuer avec l'augmentation de la teneur en agrégat d'EPVC. Il reste évident au vu des données obtenues que la résistance à la pénétration des ions chlorures des mortiers légers soit largement supérieure au mortier témoin NWM. Les corrélations entre les différents paramètres des mortiers composites sont de forme polynomiale et exhibe un bon coefficient de corrélation. Ainsi, les mortiers LMEPVC contenant des agrégats légers de polychlorure de vinyle résistent mieux aux effets nocifs des sels riches en ions chlorures (environnement salin, mers, nappes,...etc.).

Enfin, l'intérêt majeur qui a été à l'origine de cette étude est la possibilité de substituer partiellement des agrégats naturels, par un déchet à densité légers qui est les plaques de Forex. En effet les déchets étant des produits nuisibles pour l'environnement et ils sont beaucoup moins chers que les granulats naturels, qui eux, passent par des processus très coûteux. Donc, la présente étude a montré bien des résultats tout à fait encourageants et ouvre une nouvelle voie pour la valorisation des déchets de Forex dans les mortiers pour la confection des Eco-matériaux de construction verts.

En perspectives, il est intéressant de continuer l'étude de la durabilité des mortiers composites légers LMEPVC par d'autres attaques chimiques telles que : l'attaque alcaline, la



## **Conclusion générale et perspectives**

---

réaction sulfatique et l'attaque acide. Voir, aussi, même une autre étude portant sur la carbonatation et la corrosion des bétons armés.

**Nom de l'auteur : N. LATROCH**

**Titre : *Effet d'agrégats à base des déchets plastiques sur les différentes propriétés des matériaux composites mortier-polymère.***

## **Résumé**

Les déchets, d'origine plastique, constituent un des problèmes incontournables du XXIème siècle. En effet, l'augmentation de la population mondiale et sa concentration dans les villes, ainsi que le développement d'équipements industriels et de biens de consommation génèrent des quantités astronomiques de résidus plastiques. La gestion des déchets plastiques s'avère donc plus qu'inévitable en vue de résoudre ce problème de pollution qui va croître d'année en année. Il est donc important de penser à l'élaboration de matériaux composites mortier-polymère à base d'agrégats légers artificiels provenant de déchets plastiques.

Ce travail fait partie d'un projet de recherche sur la valorisation déchets plastiques composites provenant des plaques de FOREX - polychlorure de vinyle expansé- (EPVC) utilisés comme agrégats. Il apporte une contribution ayant un impact environnemental à travers la participation de ces déchets dans la formulation des mortiers composites légers LMEPVC utilisés dans le domaine de Génie Civil. En vue d'appréhender l'influence des agrégats légers d'EPVC sur le comportement des matériaux cimentaires, une étude expérimentale a été menée sur un mortier à base de ciment et de sable silico-calcaire substitué de 0, 15, 25, 50 et 75%<sup>V</sup> par ces agrégats. Ainsi, des spécimens (4x4x16 cm<sup>3</sup> et 5x5x5 cm<sup>3</sup>) ont été confectionnés avec un rapport de E/C= 0,5. On a caractérisé le comportement physico-mécanique et thermique des mortiers LMEPVC à température ambiante et sous hautes températures. En plus, on a étudié la résistance chimique de ces mortiers vis-à-vis de la pénétration des ions chlorures. Afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitable, il a été nécessaire d'introduire des analyses de microstructures telles que MOP, MEB, DRX et l'IRTF. Les résultats obtenus sont encourageants et ont montré que (1) l'inclusion d'un taux de 75% en EPVC dans les mortiers composites augmente la ductilité et réduit le Ed de 66% par rapport au mortier de référence NWM ; (2) les agrégats en EPVC abaissent les propriétés thermiques, d'où, une amélioration des performances énergétiques des mortiers LMEPVC; (3) le composite LMEPVC75 conserve un taux modéré de ces propriétés malgré l'exposition à une température de 850°C ; (4) l'incorporation des agrégats d'EPVC diminue le coefficient de diffusion apparent des ions chlorures par rapport au mortier témoin NWM. L'observation au MEB révèle un faible agencement ITZ entre l'agrégat d'EPVC et la matrice cimentaire. Ces nouveaux composites semblent offrir un matériau à faible coût avec des propriétés cohérentes, par ailleurs, ils aideraient à résoudre certains problèmes de déchets solides créés par la production des matières plastiques et pourraient être un facteur d'économie d'énergie.

## **Mots-clés :**

Déchets de Plaques de PVC expansé (Forex), Mortiers composites légers (LMEPVC), Propriétés physico-mécaniques, UPV, Module dynamique Ed, Conductivité thermique, Résistance au feu, Pénétration des ions chlorures, MOP, MEB, DRX, IRTF.